



Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu  
Wydział Leśny i Technologii Drewna

Zygmunt Stanula

**Ekonomiczne i ekologiczne aspekty obrotu drewnem okrągłym  
w Polsce**

Economic and ecological aspects of roundwood trading in Poland

Rozprawa doktorska w dziedzinie nauk rolniczych  
w dyscyplinie nauki leśne

Doctoral dissertation in the field of agricultural sciences  
in the discipline of forest sciences

Promotor:

prof. dr hab. Krzysztof Adamowicz

Katedra Ekonomii i Techniki Leśnej  
Wydział Leśny i Technologii Drewna  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Promotor pomocniczy:

Prof. UPP dr hab. Arkadiusz Tomczak

Katedra Użytkowania Lasu  
Wydział Leśny i Technologii Drewna  
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

Poznań, 2024

## Spis treści

1. WSTĘP .....	4
2. CEL I ZAKRES PRACY .....	9
5. MATERIAŁ I METODY .....	11
6. WYNIKI .....	17
Publikacja 2 .....	19
6.1. Zrównoważony rozwój w łańcuchach dostaw biomasy leśnej .....	19
Kwestie ekonomiczne .....	19
Kwestie środowiskowe .....	21
Kwestie społeczne .....	22
6.2. Ocena łańcuchów dostaw biomasy leśnej .....	22
Oceny ekonomiczne .....	22
Oceny środowiskowe .....	23
Oceny społeczne i wieloczynnikowe .....	24
6.3. Optymalizacja łańcuchów dostaw biomasy leśnej .....	24
Optymalizacja ekonomiczna .....	25
Optymalizacja ekonomiczna, środowiskowa i społeczna .....	25
Publikacja 3 .....	28
6.4. Charakterystyka ekologicznych aspektów transportu .....	28
Publikacja 4 .....	34
Publikacja 6 .....	38
6.5. Efektywność i wartość dodana przerobu w odniesieniu do jakości surowca .....	38
7. DYSKUSJA .....	42
8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	59
9. BIBLIOGRAFIA .....	64
<b>Streszczenie w języku polskim .....</b>	<b>73</b>
<b>Streszczenie w języku angielskim .....</b>	<b>74</b>
<b>Oświadczenia autorów o współudziale w publikacji .....</b>	<b>75</b>
<b>Kopie publikacji będące podstawą do rozprawy doktorskiej .....</b>	<b>81</b>

### Wykaz osiągnięć naukowych stanowiących cykl publikacyjny:

1. **Stanula Z.**, Bieńkowski S. Wood supply in Poland in relation to the expectations of wood industry. *Intercathedra* nr 29/1, 2013. (#1)
2. **Stanula, Z.**; Wieruszewski, M.; Zydrón, A.; Adamowicz, K. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies* 2023, 16, 7997. DOI: 10.3390/en16247997 (#2)
3. **Stanula Z.**, Wieruszewski M., Mydlarz K., Adamowicz K. Fuel use reduction and economic savings from optimization of road transportation of coniferous roundwood. *Energies*. 2023, vol. 16 (issue 14), art. no. 5334; DOI: 10.3390/en16145334 (#3)
4. Górna A., Wieruszewski M., Szabelska-Beręsewicz A., **Stanula Z.**, Adamowicz K. Biomass price prediction based on the example of Poland. *Forests*. 2022, vol. 13 (issue 12), art. no. 2179; DOI: 10.3390/f13122179, (#4)
5. Górna A., Szabelska-Beręsewicz A., Wieruszewski M., Starosta-Grala M., **Stanula Z.**, Kozuch A., Adamowicz K. Predicting post-production biomass prices. *Energies*. 2023, vol. 16 (issue 8), art. no. 3470, DOI: 10.3390/en16083470 (#5)
6. **Stanula Z.**, Wieruszewski M., Dynowska J., Adamowicz K. Comparative efficiency of roundwood processing into pallet lumber. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2024, Vol. 66 (4), 310–316, w publikacji, DOI: 10.2478/ffp-2024-0023, (#6)

## 1. WSTĘP

Rynek drewna okrągłego odgrywa kluczową rolę w zrównoważonym rozwoju gospodarczym i ekologicznym, co znajduje odzwierciedlenie w politykach wielu krajów. Jak wskazują badania, klaster przemysłów leśnych przyczynia się do rozwoju gospodarczego poprzez stymulowanie konsumpcji odnawialnych zasobów. Przykładem są kraje Unii Europejskiej, które realizują strategię opartą na zrównoważonym zarządzaniu lasami, integrując aspekty ekonomiczne, społeczne i ekologiczne w długoterminowej polityce leśnej (Bykanova i in., 2018).

Toppinem (1998) twierdzi, że w sektorze leśnym, kluczowym elementem są rynki drewna okrągłego, które stanowią istotny czynnik w gospodarce wielu krajów. W badaniach nad tym sektorem kluczowe znaczenie ma zrozumienie, jak zmienne rynkowe takie jak popyt, podaż oraz ceny kształtują rozwój tego sektora. Ponadto sektor ten jest bezpośrednio związany ze stopniowo wdrażaną koncepcją zrównoważonego rozwoju cywilizacyjnego. Wydaje się, że leśnictwo oraz drzewnictwo odgrywają obecnie kluczową rolę zarówno w rozwoju gospodarczym, jak i w zrównoważonym zarządzaniu zasobami naturalnymi w Europie.

Według danych FAO (2020), choć lasy na świecie zmniejszają się to w Europie podejmowane są znaczące wysiłki na rzecz ich ochrony. Działanie to przejawia się wzrostem obszarów chronionych. Równocześnie ze wzrostem powierzchni chronionych rośnie zapotrzebowanie na produkty z drewna (Raihan 2023). Wskazuje to na rosnące znaczenie tego surowca w gospodarce europejskiej z jednoczesnym trendem zmierzającym do zmniejszenia poziomu użytkowania europejskich w tym w szczególności polskich lasów. Budzi to uzasadnione kontrowersje. Dlatego należy uznać, że badania rynku surowca drzewnego łączące aspekty ekonomiczne z ekologicznymi będą zyskiwały w najbliższych latach na znaczeniu.

Należy podkreślić, że surowiec drzewny jest szczególnie istotnym elementem rozwoju gospodarczego. Polska jest jednym z głównych producentów wyrobów z drewna. Analiza branży drzewno-meblarskiej przeprowadzona przez Bank Pekao S.A. w 2023 roku (Mrówczyński i in. 2023), wskazuje, że jest to jeden z najważniejszych sektorów polskiej gospodarki. W 2022 roku sprzedaż produkcji przemysłu drzewnego wyniosła 46,7 mld zł, przemysłu meblarskiego 54,2 mld zł, a celulozowo-papierniczego 76,7 mld zł, co razem daje 178 mld zł. Branże te odpowiadały w 2022 roku za 11,8% wartości dodanej brutto przetwórstwa przemysłowego, co pokazuje ich znaczenie dla krajowej gospodarki (Czemko 2024).

Równocześnie sektor leśny ma istotne znaczenie dla zatrudnienia w Europie. W UE sektor ten zatrudnia ponad 2 miliony osób i generuje ponad 100 milionów euro wartości dodanej rocznie (Raihan 2023). W polskim przemyśle drzewnym działa około 40 tys. firm. Zatrudnienie w całym sektorze leśno-drzewnym, włączając sektor usług leśnych, wynosi około 461 tys. osób (Raport Deloitte 2021). Co więcej, udział eksportu w przychodach przemysłu drzewnego wynosi 39%, a meblarskiego 65%, co pokazuje znaczenie polskiego drewna i wyrobów drewnianych na rynkach międzynarodowych. Dodatkowo saldo handlu zagranicznego dla całego sektora wynosi +14,4 mld EURO, co jest najlepszym wynikiem w Europie (Czemko 2024).

Jednakże, cała ta struktura gospodarcza opiera się na jednym, podstawowym zasobie – dostępności drewna, pozyskiwanego w europejskich lasach. W kontekście globalnych zmian klimatycznych oraz rosnącego zapotrzebowania na surowce odnawialne, kluczowe staje się zrozumienie ekonomicznych i ekologicznych aspektów obrotu drewnem okrągłym, zarówno w Polsce, jak i w innych krajach Europy. Z jednej strony drewno odgrywa istotną rolę jako surowiec przemysłowy, z drugiej zaś jego zrównoważone pozyskiwanie i wykorzystanie mają bezpośredni wpływ na ochronę zasobów naturalnych i ograniczanie emisji gazów cieplarnianych.

Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia, które obrazują sytuację związaną z całym sektorem leśno-drzewnym, postanowiono poddać analizie te kwestie poprzez cykl spójnych tematycznie publikacji. Podkreślenia wymaga fakt, że w Polsce surowiec drzewny odgrywa kluczową rolę w funkcjonowaniu i rozwoju przemysłu drzewnego. Polska, będąc jednym z większych producentów i eksporterów produktów drzewnych w Europie, opiera swoje możliwości rozwoju przemysłu na dostępności surowca drzewnego. W szczególności dostępność drewna odpowiedniej jakości i w odpowiedniej ilości jest kluczowa dla planowania produkcji i realizacji celów przemysłowych. Ma to szczególne znaczenie dla przemysłu budowlanego, meblarskiego i innych gałęzi gospodarki związanych z obróbką drewna. Jak podkreślają Mydlarz i in. (2013), potencjał sektora drzewnego zależy głównie od dostępności drewna oraz popytu na produkty drzewne. Przemysł ten czerpie korzyści z przewidywalności dostaw surowca, co zapewnia długotrwały rozwój przedsiębiorstw przetwarzających drewno. Mając to na uwadze w cyklu monotematycznych artykułów wykorzystano między innymi wyniki autorskich badań, w którym poddano analizie zaopatrzenie w drewno w Polsce na tle oczekiwań przemysłu drzewnego (#1).

Jak wskazuje Cambero i Sowlati (2014), optymalizacja łańcucha dostaw biomasy leśnej ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia konkurencyjności i długoterminowej opłacalności projektów związanych z biomasą. Transport i logistyka stanowią istotny koszt całego procesu. Na zagadnienie to zwrócili również uwagę Malladi i Sowlati (2018), którzy w kontekście kosztów logistyki wskazali na konieczność jej poprawy, w tym na istotną rolę optymalizacji transportu. Co istotne optymalizacja procesów logistycznych w sektorze leśno-drzewnym ma również istotny wpływ na redukcję emisji CO<sub>2</sub>, co jest zgodne z założeniami polityki zrównoważonego rozwoju. Modele optymalizacyjne, które uwzględniają emisje z operacji logistycznych, sugerują rozproszoną lokalizację zakładów przetwórczych, co pozwala na skrócenie tras transportowych i zmniejszenie emisji (Maladia i Sowlati 2014). Podejście prezentowane przez tych autorów może mieć kluczowe znaczenie dla polskiego przemysłu drzewnego. Odległości między źródłami surowca a zakładami przetwórczymi w istotny sposób wpływają na koszty operacyjne. Dodatkowo, mają one duże znaczenie ekologiczne, ponieważ skrócenie tras transportowych przyczynia się do redukcji emisji gazów cieplarnianych. To wspiera realizację celów zrównoważonego rozwoju, jednocześnie optymalizując ekonomiczne aspekty funkcjonowania całego sektora. Mając to na uwadze w opracowaniu wykorzystano kolejne badania, które obejmowały swoim zakresem optymalizację logistyki dystrybucji biomasy leśnej z wielopoziomowej perspektywy (#2) oraz dotyczyły oceny możliwości redukcji zużycia paliwa i oszczędności ekonomicznych w transporcie drogowym, na przykładzie spedycji drewna iglastego (#3).

Zajmując się zagadnieniami związanymi z obrotem jakimkolwiek surowcem nie sposób nie wspomnieć o jednym z najważniejszych elementów gry rynkowej jakim jest cena. Znaczenie cen na rynku drewna okrągłego jest kluczowe dla zrozumienia ekonomicznych i ekologicznych aspektów przemysłu drzewnego w Polsce. Jak podkreślają Chudy i Hagler (2020) badanie relacji cenowych na rynku drewna okrągłego jest istotne z trzech powodów. Po pierwsze, istotnym zagadnieniem jest zrozumienie zjawiska wahań cen. Zagadnienie to z oczywistych przyczyn jest kluczowe dla inwestorów i właścicieli lasów. Zintegrowane rynki reagują na zmiany cen na jednym z nich, co może stabilizować ceny na innych rynkach. Po drugie, wiedza o zmieniających się cenach może pomóc inwestorom w wyborze aktywów do handlu lub dywersyfikacji portfeli. Pozwala to na wsparcie procesu decyzyjnego w zakresie inwestycji w regionach o słabo skorelowanych cenach drewna. Po trzecie, integracja rynkowa dostarcza informacji o przepływach handlowych, co jest cenne dla decydentów, zwłaszcza w kontekście lokalizacji infrastruktury

drzewnej np. tartaków (Jaunky i Lundmark 2015). W Polsce ceny drewna okrągłego wykazują zmienność, którą kształtują zarówno czynniki lokalne, jak i międzynarodowe. Przykładowo, istnieje zauważalna asymetria cenowa w łańcuchu wartości materiałów drzewnych, gdzie ceny drewna okrągłego spadają, podczas gdy ceny przetworzonych materiałów drzewnych, takich jak tarcica, znacząco rosną. Zdarzają się również sytuacje odwrotne. Co więcej, polski przemysł drzewny w dużej mierze opiera się na krajowych zasobach, jednak wahania na rynkach międzynarodowych, takie jak wzrost importu drewna z krajów takich jak Szwecja czy Austria, również wpływają na krajowe ceny. Te zmiany mają wpływ na dynamikę podaży i popytu (Mikołajczak i in. 2020).

Cytowane powyżej wyniki badań podkreślają kluczową rolę cen drewna okrągłego w kształtowaniu przyszłości polskiego przemysłu drzewnego, zarówno pod względem ekonomicznym, jak i w kontekście zapewnienia zrównoważonych praktyk zarządzania lasami. Mając na uwadze fakt, że w literaturze przedmiotu istnieje szereg opracowań dotyczących analiz cen surowca drzewnego (m in.: Adamowicz 2010; Zastocki i in 2012; Suchodolski i Idzik 2018; Mirski i in. 2020; Parzych i Mandziuk 2021). W niniejszym opracowaniu skupiono się na, stosunkowo nowym zagadnieniu, predykcji ceny jako elementu obrotu biomasą drzewną. W ramach poruszanej problematyki omówiono zagadnienie związane z czynnikami zmienności cenowej biomasy drzewnej powstającej jako produkt uboczny przerobu drewna (#4). Wykonano również badania pozwalające na ocenę elementów ekonomicznych w zakresie zmienności cenowej właściwych sortymentów drzewnych (#5).

Jednym z kluczowych zagadnień związanych z funkcjonowaniem przedsiębiorstw przetwarzających surowiec drzewny jest ich efektywność. Efektywność może być rozpatrywana w różnym kontekście. Przykładowo Neykov i in. (2023) analizowali efektywność ekonomiczną mikro i małych przedsiębiorstw w krajach UE w latach 2015–2020. Ich analiza tego zagadnienia pokazuje, że choć te przedsiębiorstwa są generalnie efektywne pod względem skali, to mają niższą efektywność techniczną. Oznacza to, że ich produktywność mogłaby zostać poprawiona bez potrzeby zwiększania ich rozmiaru. Istotny wpływ na efektywność przedsiębiorstw ma również efektywne wykorzystanie surowca. Mając to na uwadze w ramach prezentowanego cyklu badań wykorzystano wyniki dotyczące efektywności przerobu drewna sosnowego na tarcicę paletową w małych i średnich zakładach, uwzględniając zmienność jakości i wymiarów surowca oraz wpływ

cen rynkowych na wartość dodaną. W tym zakresie proces poznawczy oparto o ocenę kosztochłonności i wartości dodanej procesów przerobu drewna sosnowego (#6).

Autor ma przekonanie i nadzieję, że zaproponowana rozprawa doktorska pt.: "Ekonomiczne i ekologiczne aspekty obrotu drewnem okrągłym w Polsce" podkreśla kluczową rolę rynku drewna okrągłego w zrównoważonym rozwoju gospodarczym i ekologicznym. Poprzez cykl monotematycznych utworów postanowiono zwrócić uwagę na znaczenie tego sektora dla gospodarki wielu krajów, w szczególności w kontekście Unii Europejskiej, gdzie zarządzanie lasami opiera się na strategiach zrównoważonego rozwoju. W Polsce przemysł drzewny odgrywa bardzo istotną rolę, generując znaczący udział w PKB, a dostępność surowca drzewnego jest kluczowa dla funkcjonowania tych sektorów. Poruszone aspekty logistyki, efektywności, wpływu cen surowca na jego obrót ze szczególnym naciskiem na próbę ich prognozowania oraz znaczenie zrównoważonych praktyk w kontekście globalnych zmian klimatycznych, w opinii autora, posiada poza znaczeniem poznawczym, również pewną wartość użyteczną.

## 2. CEL I ZAKRES PRACY

W przedmiotowej rozprawie postanowiono przedstawić i omówić badania, które uwzględniały elementy oceny i optymalizacji kryteriów ekonomicznych, środowiskowych i kryteriów społecznych w projektowaniu i planowaniu łańcuchów dostaw biomasy leśnej i drzewnej do produkcji tartacznej, energetycznej i innych produktów (np. drewna konstrukcyjnego, tarcicy). Uznano, że dla kompleksowego przedstawienia i omówienia kluczowych wyzwań badawczych w opracowaniu zostaną przedstawione aspekty techniczne, ekonomiczne, środowiskowe i społeczne istotne przy projektowaniu łańcuchów dostaw biomasy drzewnej. Mając to na uwadze w przedstawionym cyklu artykułów postanowiono omawiać charakterystyczne cechy i ograniczenia analizowanych zagadnień a także wskazać sugestie dotyczące dalszych badań dotyczących tego złożonego problemu badawczego. Do szczegółowej oceny wykorzystano źródła danych w zakresie Energii Odnawialnej oraz Joint Wood Energy Enquiry, uzupełnione danymi z sektora leśnego (Joint Forestry Sector Questionnaire). Wykorzystano także raporty unijne prezentowane przez Europejski Urząd Statystyczny Eurostat, GUS (2023), portale drzewne i leśne (<https://www.drewno.pl/>; <https://www.stat.gov.pl>). Wyniki odniesiono do badań literaturowych optymalizacji i rozwoju modelowania przepływów biomasy leśnej oraz dogłębnej analizy Wood Resource Balance (WRB) w oparciu o wyżej wymienione źródła danych.

Głównym celem pracy było zweryfikowanie ekonomicznych zależności dla systemów obiegu zamkniętego rynku surowca drzewnego i biomasy przemysłowej oraz transportu drewna. Zgodnie z przyjętym tematem badawczym podstawowym przedmiotem zainteresowania naukowego były aspekty ekonomiczne i ekologiczne. Identyfikacja czynników odpowiedzialnych za logistykę ładunków w transporcie drewna wielkogabarytowego oraz analiza wartości dodanej obiegu zamkniętego w obrocie drewnem stanowią nadal ważne zagadnienie badawcze. Dlatego w rezultacie przeprowadzonych analiz wskazano rozwiązania, które pozwolą na określenie zmienności ekonomicznej drewna, które może zostać wykorzystane w praktyce. W opinii Autora, będzie to miało wpływ na optymalizację kosztów w kontekście aspektów ekonomicznych i środowiskowych pozyskania i przerobu drewna. W rezultacie będzie można wskazać zasadność podjęcia działań zmierzających do optymalizacji logistycznej i ekonomicznej, z uwzględnieniem aspektów środowiskowych zarówno w skali lokalnej jak i globalnej.

Mając na uwadze podstawowy cel badawczy pracy przyjęto następujące hipotezy badawcze które zweryfikowano w zrealizowanym procesie merytorycznym:

**Hipoteza 1:** Wykorzystanie biomasy leśnej i produktów drzewnych jako surowców w łańcuchu dostaw może znacząco przyczynić się do redukcji materiałów generujących koszty środowiskowe.

**Hipoteza 2:** Optymalizacja cyklu życia produktów w łańcuchu dostaw biomasy drzewnej pozwala na zwiększenie korzyści społecznych i środowiskowych, przy jednoczesnym zachowaniu efektywności ekonomicznej.

**Hipoteza 3:** Wahania sezonowe i rynkowe w cenach biomasy i produktów ubocznych przerobu drewna mają istotny wpływ na efektywność planowania łańcuchów dostaw oraz prognozowanie cen na rynkach lokalnych i europejskich.

**Hipoteza 4:** Optymalizacja logistyczna, związana z maksymalnym wykorzystaniem pojazdów transportowych w łańcuchach dostaw surowców drzewnych, prowadzi do znacznej redukcji emisji CO<sub>2</sub> oraz kosztów paliwowych.

**Hipoteza 5:** Efektywność produkcji wyrobów z drewna jest silnie uzależniona od relacji cenowej między surowcem drzewnym a produktami gotowymi zarówno na rynku lokalnym, jak i europejskim.

**Hipoteza 6:** Zawieranie długoterminowych umów na dostawy surowca drzewnego z Państwowym Gospodarstwem Leśnym Lasy Państwowe przyczyni się do stabilizacji cen i zapewnienia stabilnych dostaw, co pozytywnie wpłynie na rozwój przedsiębiorstw drzewnych.

## 5. MATERIAŁ I METODY

W grupie licznych produktów ubocznych procesów mechanicznego przerobu drewna zostały uwzględnione podstawowe sortymenty znajdujące się w obrocie rynkowym. Wydzielono materiały w postaci drewna okrągłego oraz materiały przerobu tartaczno. Dodatkową grupę analizowanej biomasy stanowiły zrębki, trociny i wióry z przerobów tartacznych. Ostatnią postacią produktów ubocznych przerobu drewna okrągłego stanowiła kora sosnowa znajdująca swoje miejsce w rynku biomasy energetycznej oraz produktu bezpośrednio trafiającego na rynek jako kory ogrodniczej. Dane dotyczące cen drzewnych produktów pozyskano w wyniku weryfikacji bezpośrednich cen rynkowych oraz danych literaturowych (Litwinowicz-Krakus i Regulski 2023, GUS 2023).

W przeprowadzonej ocenie zmian cen surowca drzewnego uwzględniono czynniki zewnętrzne takie jak inflacja, kryzys gospodarczy. Zmiany w cenach historycznych zostały uwzględnione na poziomie danych wejściowych. Prognoza również obejmuje te czynniki w wartości danych wyjściowych.

Jako obszar podjętych badań logistyki dostaw surowca wybrano dostawy drewna sosnowego (*Pinus sylvestris* L.) realizowane w zachodniej części Polski, pochodzącego z 9 Dyrekcji Regionalnych Lasów Państwowych z uwzględnieniem 233 nadleśnictw zlokalizowanych we wskazanym regionie Europy Środkowej. Badania obejmowały studium przypadku dla roku 2022. W badaniach wykorzystano materiały źródłowe dotyczące transportu drewna o miąższości ponad 1 mln m<sup>3</sup>. Punktem wyjścia do podjęcia tematu były obowiązujące w Polsce regulacje informujące o dopuszczalnej maksymalnej masie surowca drzewnego transportowanego z wybranych nadleśnictw do odbiorców przemysłu drzewnego.

W niniejszym studium przypadku skupiono się na transporcie samochodowym wielkowymiarowego drewna okrągłego zgodnie z Zarządzeniem 51 DGLP z 2019 roku oraz Zarządzeniem nr 54 DGLP z roku 2020. Postać i rodzaj drewna określa maksymalną dopuszczalną całkowitą masę zespołu pojazdów (DCM). Rodzaj drewna przyjęty do badań dotyczył sortymentów wielkowymiarowych, którego zakres wymiarowy obejmuje średnicę powyżej 14 cm w górnym końcu (bez kory), oraz długości powyżej 2,5 m. Pomiary dopuszczalnej masy zestawu pojazdów (pojazdy złączone ze sobą w celu poruszania się po drodze jako całość)

pozyskano z danych kart technicznych producentów zespołów pojazdów. Przy obliczaniu ładowności zespołu pojazdów, niezależnie od zastosowanej metody obliczeniowej, uwzględniano ładunek drewna sosnowego o objętości 25 m<sup>3</sup> lub 30 m<sup>3</sup> (w zależności od deklarowanego wyposażenia samochodu ciężarowego). W związku z rzeczywistą masą zespołu pojazdów, w dalszych analizach przyjęto ich maksymalne dopuszczalne obciążenie na poziomie 40 Mg.

Przy rozpatrywaniu ekonomicznego i środowiskowego kosztu transportu zwrócono uwagę na dwa kluczowe parametry: dystans oraz poziom zużycia paliwa. Ich udział w całkowitych kosztach transportu jest znaczący i może się zmieniać. Czynniki wpływającymi na koszty transportu są m.in.: cena paliwa i jego zużycie, które zależy od optymalizacji wykorzystania pojazdu, drogi przemieszczenia się czy prędkości pojazdu.

Ceny paliw w euro zostały obliczone na podstawie kursów walut podanych przez Narodowy Bank Polski. Średnia cena oleju napędowego za rok 2022 wyniosła 1,41 EURO/litr (GUS 2023).

Zarówno tonaż pojazdu jak i prędkość jego przemieszczania mają przełożenie na średnie spalanie, które kształtuje się w granicach 24-33 l/100 km. Na potrzeby przeprowadzonych badań, po weryfikacji danych pochodzących z dominujących w Polsce firm transportowych, przyjęto wartość średnią na poziomie 29 l/100 km.

W obliczeniach uwzględniono zarówno koszty paliwa transportu jak i wykorzystanie środków transportu w stosunku do dopuszczalnej miąższości sosnowego surowca drzewnego. W wyniku przeprowadzonego badania ustalono m.in:

- procentowy udział dostaw w skali rocznej,
- potencjalną liczbę przejazdów, w zależności od ładowności pojazdu i odległości dostaw dla przyjętej puli 1mln m<sup>3</sup> surowca,
- łączną emisję CO<sub>2</sub> osiąganą w wyniku drogi przebytej przez pojazdy transportowe o dopuszczalnym obciążeniu 40 Mg,
- szacunkowe odchylenie wagi przewożonego ładunku,
- szacunkowe koszty paliwa w funkcji określonej ładowności pojazdów.

Obniżenie zużycia paliwa jest niezmiernie ważne, gdyż spaliny samochodowe w dużej części zawierają związki toksyczne, emitowane przez silnik. Stąd nie tylko rodzaj szkodliwych substancji ma znaczenie, ale także ich stężenie. Dla środowiska największy problem stanowi CO<sub>2</sub>. Spaliny zawierają również inne substancje zanieczyszczające, ale z uwagi na ich śladowe ilości nie wzięto ich pod uwagę w badaniach. Emisja CO<sub>2</sub> ze źródeł antropogenicznych, a więc i spalin samochodowych, przyczynia się do wzrostu efektu cieplarnianego. Dlatego tak ważna jest zwiększona świadomość ekologiczna społeczeństwa, która wpływa na poprawną i oszczędną eksploatację pojazdów, a w rezultacie niesie za sobą możliwość obniżenia emisji gazów szklarniowych. W opracowaniu zgodnie z danymi literaturowymi przyjęto, że 1 litr oleju napędowego generuje średnio 2,68 kg CO<sub>2</sub>. Dokonano analizy wykorzystania taboru samochodowego w transporcie z zastosowaniem trzech symulacji: pojazdy typu A o pojemności do 25 m<sup>3</sup>; pojazdy typu B o pojemności do 27 m<sup>3</sup>; C-pojazdy do 30 m<sup>3</sup>.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na zasady zrównoważonego rozwoju i ekonomii są aspekty technologiczne, a zwłaszcza produktywność surowca uzyskiwana w średnich zakładach, które wpływają na efektywność tej produkcji. Procesy obróbki drewna okrągłego dla potrzeb wytworzenia tarcicy i wyrobów tartacznych związane są z jednej strony z różnorodną jakością surowca okrągłego, a z drugiej zależą od otrzymywanego asortymentu wyrobów (Kupčák 2015).

Technologie i stosowane urządzenia są dokładnie powiązane z asortymentem produktów. Można tu wydzielić poszczególne grupy: małych zakładów (zatrudnienie do 50 osób - dochód do 7 mln EURO), produkujących tarcicę towarową o różnym przeznaczeniu; grupy małych i średnich tartaków (dochód do 40 milionów euro - zatrudnienie do 250 osób) specjalizujących się w produkcji tarcicy i produktach ogólnego przeznaczenia dla budownictwa (w tym produkujące więźby dachowe) wykorzystujące piły ramowe, tarczowe i taśmowe oraz wykonujące operacje prefabrykacji; grupy małych i średnich zakładów, w których dominuje produkcja wyrobów i elementów tzw. programu ogrodowego i paletowego, która rozwinęła się w Polsce w ostatnich latach i ma dużą dynamikę. Należy dodać, że tutaj wykorzystywane są tradycyjne maszyny i narzędzia do przetarcia, pilarki ramowe, zestaw urządzeń wielopiłowych. Fabryki te wykorzystują na dużą skalę automatyzację procesu i głębokiego przerobu elementów do postaci produktów finalnych. Głównymi produktami przerobów drewna okrągłego o zmiennych przedziałach cenowych (Ryc. 1) są materiały tarte o zróżnicowanej wartości rynkowej (Tab. 1). Wynikiem

przetarć są także materiały uboczne takie jak zrębki czy też trociny oraz kora (Tab. 2). Udział tych produktów jest ściśle uzależniony od stosowanej technologii przerobu oraz od postaci produktów głównych (tarcicy). Zarówno produkty główne jak i towarzyszące wpływają na kształtowanie wskaźnika efektywności procesu produkcyjnego. Przyjęto strukturę udziału wytwarzania produktów ubocznych kawałkowych (zrębki – do 20-30%) przy znacznym udziale trocin, jako efektu przetarcia (trociny – 10-15%). W ogólnej strukturze dopuszczalne jest przyjęcie efektu ekonomicznego uzyskanego z kory (do 8%) jako dodatkowej grupy produktów ubocznych, zwanych „odpadami” procesu przygotowania do przetarcia (Mydlarz i Wieruszewski 2022). Znaczna zmienność wartości produktu wynika z zmian rynku lokalnego oraz globalnego. Jednak to produkt główny, czyli tarcica i jej półfabrykaty, stanowią o głównym wskaźniku wpływu na zasadność prowadzenia procesów przerobu drewna okrągłego.



Rycina 1. Poziom cen drewna iglastego przetwarzanego na tarcicę (edrewno.pl, GUS 2023)

Tabela 1. Zestawienie uśrednionych cen sosnowej tarcicy paletowej (<https://www.drewno.pl/>, <https://www.e-drewno.pl/stock/>)

Okres	Cena tarcicy sosnowej				
	2019	2020	2021	2022	2023
	PLN/m <sup>3</sup>				
I kwartał	440	450	480	1100	1000
II kwartał	440	450	600	1300	800

III kwartał	440	450	850	1400	700
IV kwartał	450	460	1100	1100	600
średnia	442,5	452,5	757,5	1225,0	775,0

Tabela 2. Zestawienie uśrednionych cen sosnowych produktów ubocznych w latach 2019-2023 (<https://www.drewno.pl/>, <https://www.e-drewno.pl/stock/>)

Nazwa	Produkt uboczny “odpad”			
	Zrębki papiernicze	Zrębki tartaczne	Kora Sosnowa So	Trociny-wióry
Rok	PLN/m <sup>3</sup>			
2019	218	163	116	149
2020	192	140	117	135
2021	187	146	121	155
2022	330	329	238	370
2023	288	288	307	318
Udział w procesie [%]	20-30		Ok. 8	10-15

Analiza problemu kosztowego i jakościowego pozyskania surowca drzewnego w odniesieniu do branży (Bidzińska i Ratajczak 2003, Jabłoński 2000, Krzosek 2003, Lis i in. 2000) nie może abstrahować od obecnej struktury i wielkości tartaków w Polsce. Do opisu wpływu technologii wykorzystano makro wskaźnik efektywności technologicznej przerobu surowca okrągłego na tarcicę i wyroby tartaczne (Ep) formułowany w jednostkach naturalnych lub definiowany w procentach, jako suma zgodności wartości surowca tartaczno (głównego, towarzyszącego lub wyrobów tartacznych) otrzymanego z surowca tartaczno, biorąc pod uwagę koszt zakupu surowca (Hruzik i in. 2000).

Przeprowadzono analizę statystyczną w celu oceny wskaźników wydajności ekonomicznej i środowiskowej między wariantami symulowanych procesów. Analiza obejmowała jednokierunkową analizę wariancji (ANOVA), a następnie testy post hoc Tukeya. Do obliczeń wykorzystano program R jako system statystyczny. Program R jest dostępny jako wolne oprogramowanie na warunkach Powszechnej Licencji Publicznej GNU Free Software Foundation.

Metodycznie uszeregowano zakres publikacyjny tworzący cykl, gdzie kolejne działania zostały przedstawione w poniższej tabeli. Prezentują one kolejne kroki w zakresie opracowania oceny ekonomicznej przepływów surowca drzewnego na przykładzie Polski.

Tabela 3. Zakres opracowania metodycznego badań

Lp.	Tytuł artykułu	Publikacja	Zakres metodyki
1	Wood supply in Poland in relation to the expectations of wood industry	Intercathedra nr 29/1, 2013	Ocena dostępnej struktury surowa drzewnego kierowanego do sprzedaży przez LP na rynku Polskim
2	Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review	Energies 2023, 16, 7997. <a href="https://doi.org/10.3390/en16247997">https://doi.org/10.3390/en16247997</a>	Opracowanie algorytmów opisujących kierunki przepływów materiałów drzewnych w zakresie ekonomicznym
3	Fuel use reduction and economic savings from optimization of road transportation of coniferous roundwood	Energies. 2023, vol. 16 (iss. 14), art. no. 5334; DOI: 10.3390/en16145334	Redukcja kosztów w procesie transportu surowca drzewnego na przykładzie drewna sosnowego
4	Predicting post-production biomass prices	Energies. 2023, vol. 16 (iss. 8), art. no. 3470, DOI: 10.3390/en16083470	Kierunki i czynniki zmienności cenowej biomasy drzewnej jako produktów ubocznych pozyskania i przerobu drewna
5	Biomass price prediction based on the example of Poland	Forests. 2022, vol. 13 (iss. 12), art. no. 2179; DOI: 10.3390/f13122179	Ocena elementów ekonomicznych w zakresie zmienności cenowej sortymentów drzewnych w Polsce
6	Comparative efficiency of roundwood processing into pallet lumber	Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry, 2024, Vol. 66 (4), 310–316, w publikacji, DOI: 10.2478/ffp-2024-0023,	Ocena kosztocłonności i wartości dodanej procesów przerobu drewna sosnowego na materiały opakowaniowe

## 6. WYNIKI

### Publikacja 1

**Stanula Z.**, Bieńkowski S. Wood supply in Poland in relation to the expectations of wood industry. Intercathedra nr 29/1, 2013

Klasyfikacja drewna oferowanego przez Państwowe Gospodarstwo Leśne Lasy Państwowe.

Badania oraz nomenklatura zastosowana w klasyfikacji surowca, w etapie badań wstępnych bazowały na Zarządzeniu DGLP nr 72 z 27.09.2013 2013 roku w sprawie wprowadzenia warunków technicznych na drewno wielkowymiarowe iglaste. znak: GM-900-.../2013.

Lasy Państwowe oferowały drewno handlowe w czterech podstawowych kategoriach handlowych, tj. drewno małowymiarowe, drewno średniowymiarowe i drewno wielkowymiarowe oraz karpinę. Poszczególne sektory przemysłu starały się dostosować profil swojej produkcji do zasobów dostępnych na rynku. Jednak już na tym etapie dochodziło do konfliktów interesów wynikających z możliwości wykorzystania z jednej strony przez przemysł energetyczny całego wolumenu sprzedawanego drewna, a z drugiej strony produkcji forniru czy elementów przeznaczonych przy rosnącym zapotrzebowaniu na specjalnie wyselekcjonowany materiał drzewny.

Drewno małowymiarowe charakteryzowało się średnicą dolną do 7 cm mierzoną w korze. Materiał ten oferowany był w postaci drewna tyczkowego i drewna przeznaczonego do celów energetycznych. Sortymenty zaliczane do tej grupy wykorzystywane były głównie przez przemysł celulozowo-papierniczy, a także sektor materiałów drewnopochodnych oraz do celów opałowych. Wszystko to wpływało na jego cenę, która w porównaniu z pozostałymi grupami handlowymi była najniższa. W tym przypadku można stwierdzić, że nie występowały korelacje między oczekiwaniami odbiorców a produktami oferowanymi przez Lasy Państwowe. Drewno średniowymiarowe (S), to sortyment o średnicy górnej (w cieńszym końcu) bez kory 5 cm i więcej. W zależności od pozyskanego materiału był on mierzony indywidualnie w grupach lub stosach. Najczęściej oferowanym materiałem z tej grupy było S2A (drewno średniowymiarowe do użytku przemysłowego) i S2B (drewno średniowymiarowe użytkowe). Podział na surowiec S2A i S2B regulował standardowe wymagania techniczne dla obu grup surowca. Można stwierdzić,

że w zakresie drewna S2A i S2B oferowanego przez Lasy Państwowe osiągnięto kompromis, który został zaakceptowany zarówno przez sprzedającego, jak i kupującego. Pozostałe sortymenty średniowymiarowe oferowane przez Lasy Państwowe w znacznie mniejszych ilościach sortymenty to: S3 (żerdzie), S4 (drewno opałowe), S10 (drewno kopalniakowe) i S11 (słupy). Materiał drzewny z tej kategorii był wykorzystywany w przemyśle celulozowo-papierniczym, sektorze produkcji materiałów drewnopochodnych i dopiero później w przemyśle drzewnym, w sektorach produkujących drewno ogrodowe i palety. Drewno wielkowymiarowe (W) to sortyment o średnicy górnej (w cieńszym końcu) od 14 cm bez kory, mierzony w pojedynczych sztukach lub w przypadku drewna kłodowanego, ze względu na tzw. zindywidualizowanie dopuszczano się również alternatywny odbiór w stosach jak w przypadku drewna średniowymiarowego. W grupie drewna wielkowymiarowego wyróżniano dwie podgrupy: drewno wielkowymiarowe ogólnego użytku i drewno wielkowymiarowe specjalne. W przypadku tego drugiego był to tzw. surowiec wyborowy, który stanowił drewno klasyfikowane jako cenne (nieformalnie nazywane: fornirem, sklejką, drewnem teleenergetycznym lub teletechnicznym słupem drewnianym).

Najwięcej kontrowersji wzbudzał materiał z drewna wielkowymiarowego przeznaczonego do powszechnego użytku, tzw. W\_STANDARD, w przypadku którego występowały rozbieżności między oczekiwaniami branży a tym, co oferowały Lasy Państwowe pod względem jakości, a także długości. Odbiorcami tego surowca były głównie: tartaki, a także producenci drewnianej architektury ogrodowej, opakowań drewnianych, czy drewna konstrukcyjnego, którzy ze względu na charakter swoich produktów oczekują od drewna określonych cech jakościowych. Branża opakowań drewnianych, w szczególności palet, wykorzystywała w swojej produkcji około 20% drewna wielkowymiarowego niższych klas jakości (C i D) oraz 80% drewna średniowymiarowego. Z jednej strony materiał ten powinien spełniać ich standardy jakościowe, z drugiej strony powinien mieć akceptowalną cenę.

Można stwierdzić, że każda grupa jakościowa drewna wielkowymiarowego oferowana indywidualnie znalazłaby swojego odbiorcę, gdyż drewno klasy A i B było bardzo poszukiwane przez producentów sklejki i forniru, a klasa D może być z powodzeniem wykorzystywana przez przemysł celulozowo-papierniczy oraz producentów materiałów drewnopochodnych. Sprzedaż drewna handlowego w ówczesnej formie była wygodna tylko dla sprzedawcy, ponieważ oszczędzała kosztów i problemów z oddzielaniem drewna wielkowymiarowego, które

stawało się wyłączną odpowiedzialnością kupującego. Kupujący mając na uwadze różnorodność swoich produktów nie był w stanie optymalnie wykorzystać całości zakupu. Dlatego część tego drewna była przetarta ze znaczną stratą materiałową. Również jakość oferowanych kłód była niska, ponieważ w większości pozyskiwano je z zastosowaniem harwesterów. Bardzo często podczas operacji maszynowych kłody były przypadkowo okorowywane, co pozbawiało je naturalnej warstwy ochronnej w postaci kory, a drewno traciło swoją wartość z powodu sinizny i innych zabarwień. Karpina (K) była materiałem pozyskiwanym w marginalnej ilości.

Sprzedaż drewna handlowego w Polsce budziło i budzi obecnie wiele kontrowersji zarówno po stronie sprzedających, jak i kupujących. Najwięcej obaw budzą warunki sprzedaży oraz jakość i podział oferowanego surowca. Negocjacje pomiędzy przedstawicielami Lasów Państwowych a przemysłem drzewnym, które prowadzone są już od dłuższego czasu, przynoszą różnorodne rezultaty, czego dowodem jest wprowadzenie w 2012 i 2019 r. podstawowych standardów technicznych dla drewna średniowymiarowego: S2A i S2B oraz określenie zmian, w obecnie obowiązujących przepisach sprzedażowych, które w pewien sposób zagrażają zarówno interesom sprzedawcy, jak i kupującego. Niestety, nadal w zakresie sprzedaży i zakupów pozostało wiele spornych kwestii, które wymagają dalszych rozmów i negocjacji.

## Publikacja 2

**Stanula Z.**; Wieruszewski M.; Zydrón A.; Adamowicz K. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies* 2023, 16, 7997. DOI: 10.3390/en16247997

### 6.1. Zrównoważony rozwój w łańcuchach dostaw biomasy leśnej

#### Kwestie ekonomiczne

Uwarunkowania techniczne i ekonomiczne wprowadzenia biomasy drzewnej do postaci gotowych bioproduktów mogą generować dodatkowe źródła przychodów dla sektora leśno – drzewnego i poprawić rentowność działań związanych z gospodarką leśną i drzewną (Cambero i Sowlati 2014; Wieruszewski i Mydlarz 2022). Aby było to wykonalne, techniczne i ekonomiczne aspekty łańcucha dostaw są ważne i powinny być brane pod uwagę przy planowaniu nowych projektów wykorzystania biomasy leśnej.

Niektóre z najważniejszych aspektów technicznych w projektowaniu systemów przerobu biomasy są rodzaj, wydajność i skala wybranych technologii przetwarzania. Typ technologii wymaganej do przetworzenia biomasy opiera się na postaci pożądanego produktu i dostępnego rodzaju biomasy. Nowoczesne technologie konwersji są dostosowane do przetwarzania biomasy leśnej w produkty gotowe lub w ostateczności w energię (Cambero i Sowlati 2014).

Zrównoważone wykorzystanie zasobów biomasy leśnej wymaga, aby korzyści z ich obecnego wykorzystania nie zagrażały bezpieczeństwu przyszłych pokoleń (Agustina i in. 2018) powinno uwzględnić kwestie techniczne, ekonomiczne, środowiskowe i społeczne w projektowaniu łańcuchów dostaw biomasy leśnej (Stanula i in. 2023).

Wydajność konwersji materiałowej dostępnej dla danej technologii określa ilość produktu, który można uzyskać na jednostkę wkładu biomasy drzewnej. Wyższa wydajność oznacza niższe koszty operacyjne, ale zazwyczaj wiąże się z wyższymi wymaganiami kapitałowymi (Górna i in. 2022). Wielkość technologii przerobu wpływa na ekonomiczną wykonalność produkcji. Ponieważ koszty przerobu są wysokie, ważne jest osiągnięcie korzyści poprzez wzrost skali produkcji (De Meyer i in. 2013). Jednak skale operacyjne są technicznie ograniczone przez ilość dostępnej biomasy i ekonomicznie ograniczone przez koszt biomasy dostarczanej do zakładu. Wybór technologii przerobu, wydajność i koszty transportu zależą od ilości dostępnej biomasy. Koszty pozyskania biomasy obejmują wszystkie koszty związane z gromadzeniem, przechowywaniem, wstępnym przetwarzaniem i transportem biomasy z jej źródła (lasu) do zakładu. Innym ważnym czynnikiem wpływającym na ekonomikę biomasy leśnej w celu wytworzenia wartościowych produktów są koszty dystrybucji tych produktów. W przypadku wyrobów drzewnych, tworzyw drzewnych, należy zaplanować operacje dystrybucyjne. W większości państw dystrybucja kołowa jest najbardziej ekonomiczną alternatywą dla dystrybucji mebli czy tarcicy i podzespołów konstrukcji drewnianych. Na niekorzyść transportu wpływają często właściwości fizyczne niektórych produktów (wymiary zewnętrzne) utrudniające wykorzystanie infrastruktury kołowej (Rentizelas i in. 2013, Stanula i in. 2023) i należy zaplanować inne formy transportu.

Połączenie czynników decyzyjnych wpływa na techniczny i ekonomiczny sukces wykorzystania biomasy drzewnej na rynkach w ujęciu ekonomicznym i w aspekcie społecznym. Efektywne łańcuchy dostaw wymagają decyzji dotyczących surowca (źródła i rodzaje); magazynowania, wstępnego przetwarzania i transportu (rodzaj, pojemność i lokalizacja);

technologii konwersji (rodzaj, wydajność i lokalizacja) produktów i rynków (rodzaj produktów i lokalizacja); oraz przepływy materiałów (surowców i produktów) w ramach łańcucha dostaw. Wszystkie te decyzje są specyficzne dla danego przypadku wyrobu i muszą odzwierciedlać specyfikę każdego kontekstu łańcucha dostaw.

## Kwestie środowiskowe

Niektóre z głównych kwestii środowiskowych związanych z biomasą leśną są związane z bilansem węgla i emisją gazów cieplarnianych i ekosystemem leśnym (Wieruszewski i in. 2022). Jednym z głównych czynników wpływających na zintensyfikowane wykorzystanie biomasy do produkcji energii i innych materiałów jest jej potencjał do zmniejszenia wykorzystania paliw kopalnych na środowisko. Zostało uznane, że wykorzystanie paliw kopalnych (np. ropy naftowej, węgla i gazu) przyspieszyło emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery, prowadząc do efektu cieplarnianego i zmian klimatycznych (Jeong 2018). Biomasa leśna jest uważana za odnawialne i niskoemisyjne źródło surowca (neutralne pod względem emisji dwutlenku węgla), ponieważ węgiel jest sekwestrowany podczas wzrostu drzew. Zakłada się, że neutralność węglowa zostanie osiągnięta w dłuższej perspektywie czasowej, gdy nowe pokolenie drzew osiągnie rozmiar możliwy do pozyskania (Camia i in. 2020). Jednak pełna ocena redukcji emisji dwutlenku węgla w procesie wykorzystania biomasy leśnej powinna uwzględniać emisje dwutlenku węgla, które wynikają głównie ze zużycia paliw kopalnych do produkcji, zbierania, przeładunku i transportu biomasy leśnej oraz jej dystrybucji. Podejście to jest przydatne do ilościowego określenia potencjalnego wpływu na zmiany klimatu, zdrowie ludzi, jakość ekosystemów i wyczerpywanie zasobów (Wieruszewski i Mydlarz 2022).

Ważnym aspektem ekologicznym w planowaniu roli biomasy leśnej jest utrzymanie ekosystemu leśnego (Hu i in. 2023). Powierzchnia leśna zapewnia również schronienie i pożywienie różnym organizmom leśnym (Tunå i Hulteberg 2014). Zastosowanie wysoce wydajnych technologii w całym łańcuchu dostaw zmniejsza ilość paliw kopalnych potrzebnych do zbierania, przetwarzania i transportu biomasy. Optymalna lokalizacja zakładów przetwarzania w pobliżu dużych źródeł biomasy (np. zakładów przetwórstwa produktów drzewnych) i rynków odbiorców zmniejsza koszt środowiskowy transportu (Ben-Iwo i in. 2016). Uwzględnienie wpływu na środowisko wyboru łańcucha dostaw jest kluczowe do maksymalizacji korzyści środowiskowych.

## Kwestie społeczne

Wprowadzenie nowych projektów wykorzystania biomasy leśnej obejmuje zmiany w sposobie życia ludzi, kulturze, społeczności, systemów politycznych, środowiska, zdrowia, ekonomii, własności, a nawet obaw i aspiracji (Lerma-Arce i in. 2017). Efekty społeczne, które są powszechnie stosowane w optymalizacji łańcuchów dostaw biomasy leśnej i można je określić ilościowo, to tworzenie miejsc pracy i dochodów. Ilość i jakość tworzonych miejsc pracy zależy od strategicznych decyzji w zakresie projektowania łańcucha dostaw biomasy leśnej. Większe inwestycje generują więcej miejsc pracy. Wraz z tworzeniem miejsc pracy, rozwój nowych projektów związanych z biomasą drzewną i leśną generuje dochód i możliwości rozwoju dla społeczności wiejskich (Coady i Duquette 2021), co może przełożyć się na poprawę dobrobytu lokalnej ludności. Badania oceniające potencjalny wpływ społeczny tych projektów powinny analizować, w jaki sposób dochód pozostanie w społeczności. Co więcej, łańcuch dostaw musi być zaplanowany tak, aby uwzględnić obawy innych społeczności dotyczące odległości zakładów od obszarów mieszkalnych, obszarów chronionych, lotnisk, terenów podmokłych i jezior, krytycznych obszarów środowiskowych (Górna i in. 2022).

### 6.2. Ocena łańcuchów dostaw biomasy leśnej

W celu podjęcia rozsądnych decyzji w zakresie projektowania i planowania łańcuchów dostaw biomasy leśnej dla potrzeb wytwarzania bioenergii i do zakładów drzewnych, decydenci muszą przewidzieć realne alternatywy i ocenić ich potencjalną wydajność ekonomiczną oraz wpływ na środowisko i społeczeństwo. Badania oceniające pomagają w ocenie lub przewidywaniu wydajności projektu z różnych perspektyw. Większość badaczy oceniających problem łańcucha dostaw rozważa pojedynczy czynnik oceny, wykorzystując narzędzia oceny ekonomicznej lub środowiskowej.

#### Oceny ekonomiczne

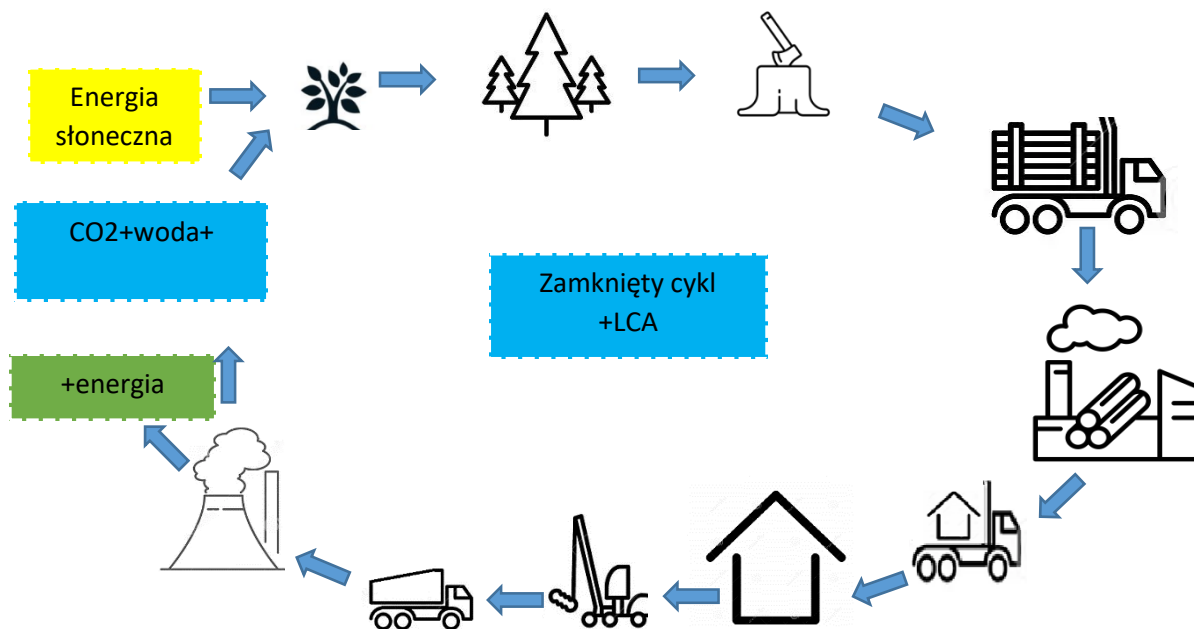
Z oceną ekonomiczną łańcuchów dostaw biomasy leśnej wiążą się analizy techniczno-ekonomiczne różnych projektów i wyborów rozwiązań technologicznych. Badania techniczno-ekonomiczne mają na celu ocenę ekonomicznej możliwości wykorzystania biomasy drzewnej w celu produkcji określonego rodzaju energii (Nikodinoska i in. 2017) lub produktu drzewnego (Hu i in. 2023). Oceny ekonomiczne dotyczą porównania między różnymi surowcami (Egnell

2016), technologiami wstępnego przetwarzania (Coakley i Petti 2021; Silvestro i in. 2021), konwersji (McKay 2006), lokalizacji zakładów (Moskalik i Gendek 2019) lub alternatywnych produktów (Stolarski i inni 2023) w konfiguracji łańcucha dostaw. Najczęstszymi wskaźnikami ekonomicznymi w tej grupie badań były koszt produkcji i wewnętrzna stopa zwrotu. Badania techniczno-ekonomiczne nie stanowią o doborze optymalnego projektu łańcucha dostaw biomasy leśnej. Oceny techniczno-ekonomiczne produktów pochodzenia leśnego opierają się na danych dotyczących zaopatrzenia i logistyki (koszty transportu i surowca). Pomijają one istotne elementy w łańcuchach dostaw biomasy leśnej, w tym rozproszenie źródeł biomasy leśnej, zmienność parametrów i zmiany warunków produkcji.

### Oceny środowiskowe

Ocena cyklu życia (LCA) jest narzędziem do oceny wpływu produktów na środowisko, procesu lub usługi pozyskania surowców do utylizacja (Ryc. 2) (Kazagic i in. 2016). W niektórych badaniach wykorzystano LCA do ilościowego określenia środowiskowego znaczenia biomasy leśnej w określonym zastosowaniu (Luo i in. 2020) lub porównania różnych alternatyw konfiguracji łańcucha dostaw czy strategii usuwania pozostałości leśnych (Kadam i in. 2000). Porównywana jest efektywność środowiskowa różnej biomasy leśnej i/lub innych źródeł energii do wytwarzania ciepła (Tunå i Hultheberg 2014), wytwarzania energii elektrycznej, skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej (CHP) (Hofmeister i in. 2015, Hauschild i in. 2018), do produkcji pelletów (Sgarbossa i in. 2020), podczas gdy inni porównywali różne typy i wielkości technologii w wytworzeniu energii (Zhang i in. 2015).

Różne badania LCA nie powinny być wykorzystywane jako podstawa do porównawczej deklaracji środowiskowej kilku produktów (Yu i in. 2021). Wyniki LCA zależą od wyborów metodologicznych, czyli od definiowania zakresu, metod oceny wpływu, procedur alokacji i systemów referencyjnych oraz parametrów związanych z warunkami lokalnymi (Ghafghazi i in. 2011). Wyniki LCA są skuteczne w zrozumieniu kompromisów środowiskowych na wszystkich etapach cyklu życia projektu wykorzystania biomasy leśnej, unikając przesunięcia projektu wykorzystania biomasy leśnej, unikając przenoszenia obciążeń wynikających z częściowych analiz środowiskowych podczas projektowania łańcucha dostaw. Wyniki LCA są również przydatne do porównywania wpływu na środowisko alternatywnych konfiguracji łańcucha dostaw biomasy leśnej, pod warunkiem oceny w ramach porównywalnych założeń modelowania.



Rycina 2. Cykl życia produktu LCA w obiegu zamkniętym na przykładzie budownictwa drewnianego - obieg zamknięty; CO<sub>2</sub> + woda + energia słońca - Las - pozyskanie - transport - przerób - konstrukcja - użytkowanie - rozbiórka - recykling - spalanie - Energia + CO<sub>2</sub> + woda

### Oceny społeczne i wieloczynnikowe

Wiele wskaźników wykorzystywanych do oceny łańcuchów dostaw biomasy leśnej związane jest z czynnikami zrównoważonego rozwoju (Zhang i in. 2015, Mydlarz i Wieruszewski 2020), wpływem społeczno-gospodarczym i środowiskowym. Na ocenę wpływu na zrównoważony rozwój w łańcuchach dostaw w leśnictwie wpływają trzy wskaźniki: koszt produkcji, zatrudnienie i emisja (Goryunov i in. 2016). Narzędzia oceny ekonomicznej, środowiskowej i społecznej pomagają w analizowaniu i porównywaniu łańcuchów dostaw biomasy leśnej. Nie są one jednak w stanie zalecić optymalnego projektu łańcucha dostaw biomasy leśnej, biorąc pod uwagę złożoności wyborów. Zadanie to może być realizowane przez zastosowanie programowania matematycznego lub procesy optymalizacyjne (Kamalakkannan i Kulatunga 2021).

### 6.3. Optymalizacja łańcuchów dostaw biomasy leśnej

Optymalizacja łańcucha dostaw zazwyczaj składa się z funkcji celu w postaci równania będącego matematyczną funkcją zmiennych decyzyjnych i innych parametrów. Zakres badań

optymalizacyjnych koncentrował się na wspieraniu decyzji w projektowaniu, planowaniu i zarządzaniu łańcuchami dostaw biomasy leśnej i drzewnej. Większość z nich uwzględniała funkcję celu ekonomicznego. Działania w celu optymalizacji wielu celów, które obejmowały wyniki ekonomiczne, wpływ na środowisko i wskaźniki badań optymalizacyjnych łańcuchów dostaw biomasy leśnej.

### Optymalizacja ekonomiczna

Modele optymalizacji ekonomicznej są opracowywane w zakresie decyzji strategicznych i taktycznych planowania łańcucha dostaw biomasy leśnej. Modele strategiczne mają na celu uwzględnienie długoterminowe decyzji planistycznych i pozwalają na podejmowanie decyzji na wysokim poziomie niepewności podejmowanie decyzji. Większość problemów jest formułowana jako zminimalizowanie całkowitego kosztu łańcucha dostaw, a w mniejszym stopniu maksymalizacja zysku na różnych etapach łańcucha dostaw (Stanula i in. 2023). Model optymalizacyjny można zastosować do różnych łańcuchów dostaw, gdy podstawowe założenia są równie ważne dla wszystkich z nich. Rozwój tworzonych algorytmów LCA oraz postępy w oprogramowaniu obliczeniowym pozwalają na włączenie dużej liczby parametrów, zmiennych decyzyjnych i zapewnienie optymalnych rozwiązań w odniesieniu do zdefiniowanej funkcji celu optymalizacji ekonomicznej (Atashbar i in. 2016).

Modele optymalizacji integrują etapy łańcucha dostaw i produkty z biomasy leśnej oraz drzewnej. Część modeli optymalizacyjnych łańcucha zakładały brak konfliktu interesów między uczestnikami łańcucha dostaw. Może tak być w przypadku dużych firm. Jednak w praktyce inne założenia może prezentować każdy uczestnik łańcucha dostaw. Każdy z nich stara się zoptymalizować własną wydajność. Optymalizacja łańcuchów dostaw biomasy leśnej i produktów drzewnych wynika z negocjacji między niezależnymi podmiotami. Jest to obszar wciąż słabo rozwinięty w badaniach łańcucha dostaw.

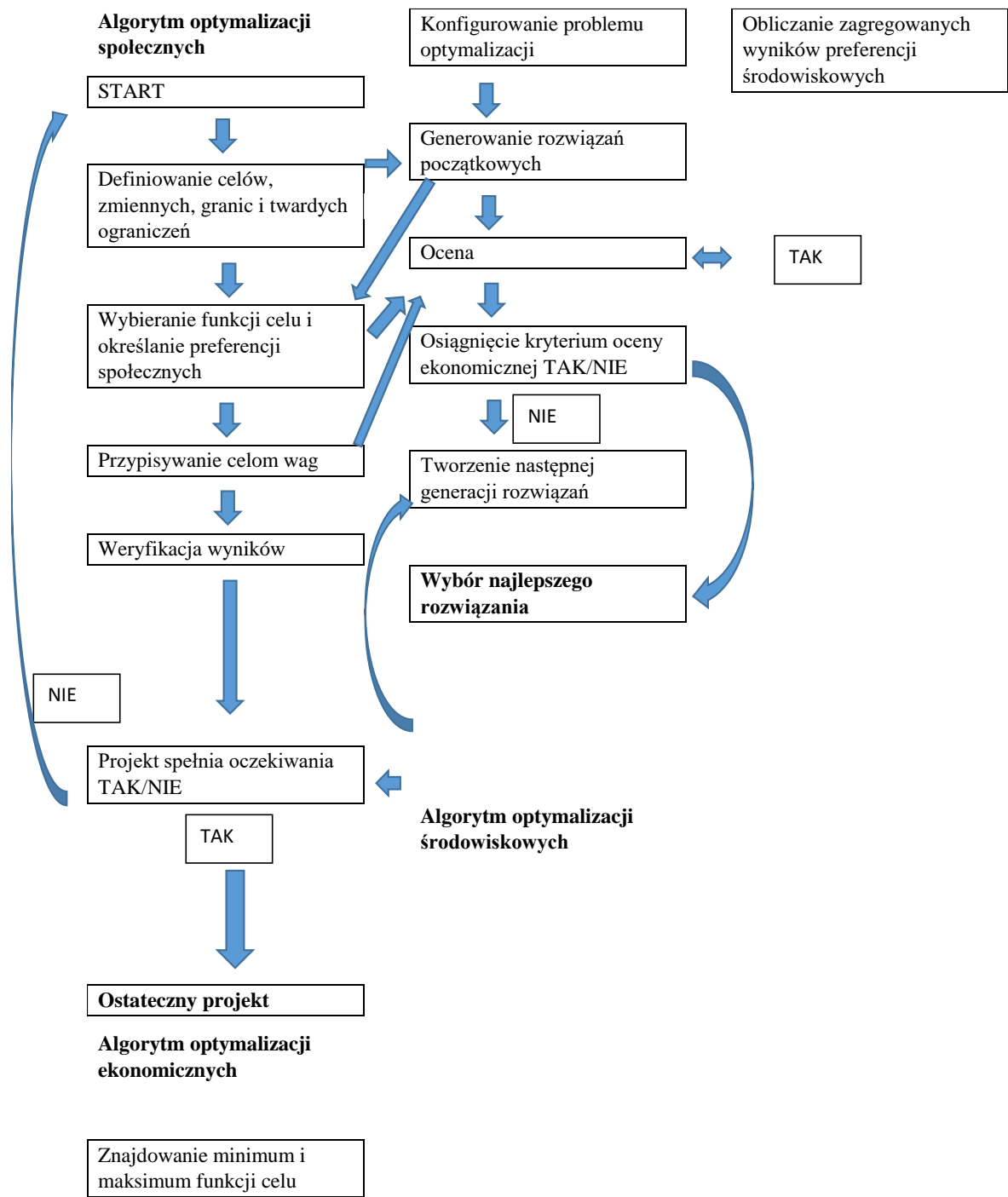
### Optymalizacja ekonomiczna, środowiskowa i społeczna

Integracja celów ekonomicznych, społecznych i środowiskowych dla optymalizacji łańcuchów dostaw biomasy leśnej jest uwzględniana w nielicznych badaniach wykorzystujących podejście optymalizacji wielopodmiotowej. Optymalizacja ta w ramach badań operacyjnych, pomaga dokonywać wyborów charakteryzujących się wieloma, niewspółmiernymi i sprzecznymi

celami (Safarian 2023). W optymalizacji wielopodmiotowej nie istnieje jedno optymalne rozwiązanie, które łączy wszystkie cele. Opracowuje się zestaw rozwiązań optymalnych (Yagi i Nakata 2011). Optymalne jest rozwiązanie, w którym jednego z celów nie można poprawić bez poświęcenia innego.

Włączenie LCA do optymalizacji wielopodmiotowej w celu optymalizacji systemu (Helal i in. 2023) zostało użyte głównie w inżynierii systemów procesowych (Campbell i Anderson 2016). Połączenie tych metod do wspierania decyzji w łańcuchach dostaw biomasy leśnej jest stosunkowo nowym obszarem badań. Zgodnie z najlepszą wiedzą autorów, niewiele jest badań o tych optymalizacjach związanych z wykorzystaniem biomasy leśnej i drzewnej (Duczowska i in. 2022) do optymalizacji wieloobiektywnej.

Zastosowanie metod wielopodmiotowych w projektowaniu łańcuchów dostaw biomasy leśnej dla bioenergii i produktów drzewnych pozwala na przybliżenie rzeczywistości poprzez uwzględnienie wielu czynników, które są ważne w procesie podejmowania decyzji. Zapewnienie spójności w formułowaniu różnych celów jest dużym wyzwaniem (Ryc. 3). Na przykład, łącząc LCA i modele wielopodmiotowe w projektowaniu łańcuchów dostaw biomasy leśnej, należy zdecydować czy uwzględnić wpływ na środowisko związane z leśną uprawą i pozyskiwaniem drewna, produkcją tarcicy, wykorzystaniem produktów i utylizacją odpadów (składowanie popiołu, odpadów drzewnych i nie drzewnych), dla uniknięcia emisji i zastąpienia paliwa nieodnawialnego. Cechy, które są poza zakresem analiz ekonomicznych łańcuchów dostaw biomasy leśnej, mogą mieć znaczący wpływ na środowisko (Santos i in. 2019; Zhilyaev i in. 2022; Husgafvel i Sakaguchi 2023).



Rycina3. Schemat algorytmu optymalizacji wielopodmiotowej: ekonomicznej, środowiskowej i społecznej

**Stanula Z.**, Wieruszewski M., Mydlarz K., Adamowicz K. Fuel use reduction and economic savings from optimization of road transportation of coniferous roundwood. *Energies*. 2023, vol. 16 (issue 14), art. no. 5334; DOI: 10.3390/en16145334

#### 6.4. Charakterystyka ekologicznych aspektów transportu

W badaniach przeanalizowano transport drewna iglastego zrealizowany w przyjętym okresie i przez określony podmiot gospodarczy, modelując dostawy dla objętości 1 miliona m<sup>3</sup> wielkowymiarowego drewna okrągłego. Dla przyjętej miąższości przetransportowanego surowca określono także pokonane dystanse (Tab. 4).

W zależności od analizowanego regionu Polski, drewno okrągłe sosnowe jest transportowane na średnich dystansach o długościach w granicach od 93 do 424 km. Dostawy te przypadają na szczyt zapotrzebowania produkcyjnego na drewno okrągłe, w badaniach oceniono transport 1 mln m<sup>3</sup> surowca sosnowego, przy całkowitym pozyskaniu drewna wielkowymiarowego iglastego w Polsce, w analizowanym roku na poziomie 15 mln m<sup>3</sup>. Największą ilość drewna okrągłego przewieziono na dystansie do 40 km, co stanowiło około 23% dostarczonej objętości surowca sosnowego.

Tabela 4. Odległości transportowe surowca drzewnego w 2022 r.

Dyrekcja Regionalna	Wrocław	Szczecin	Olisztyn	Piła	Szczecinek	Gdańsk	Toruń	Łącznie
N – liczba nadleśnictw	33	32	34	20	29	16	28	234
Dystans	Km							
Min	300	240	80	140	130	50	40	40
średnia	424	308	173	197	194	129	93	285
Max	530	380	285	250	250	200	145	530
SD	58,47	40,81	45,59	30,51	31,24	55,44	30,69	144.31
V	3418	1665	2078	931	976	3073	942	20825

Uwzględniając rzeczywistą objętość przewożonego surowca oraz maksymalne dopuszczalne objętości pojazdów na poziomie 25 m<sup>3</sup> i 30 m<sup>3</sup> oraz średnią 27 m<sup>3</sup>, wskazano rozbieżności, które wskazują na przeciążenia jak i niedociążenia pojazdów (Tab. 5 i 6).

Tabela 5. Masa zespołu pojazdów z systemem samozaładowczym drewna w 2022 r.

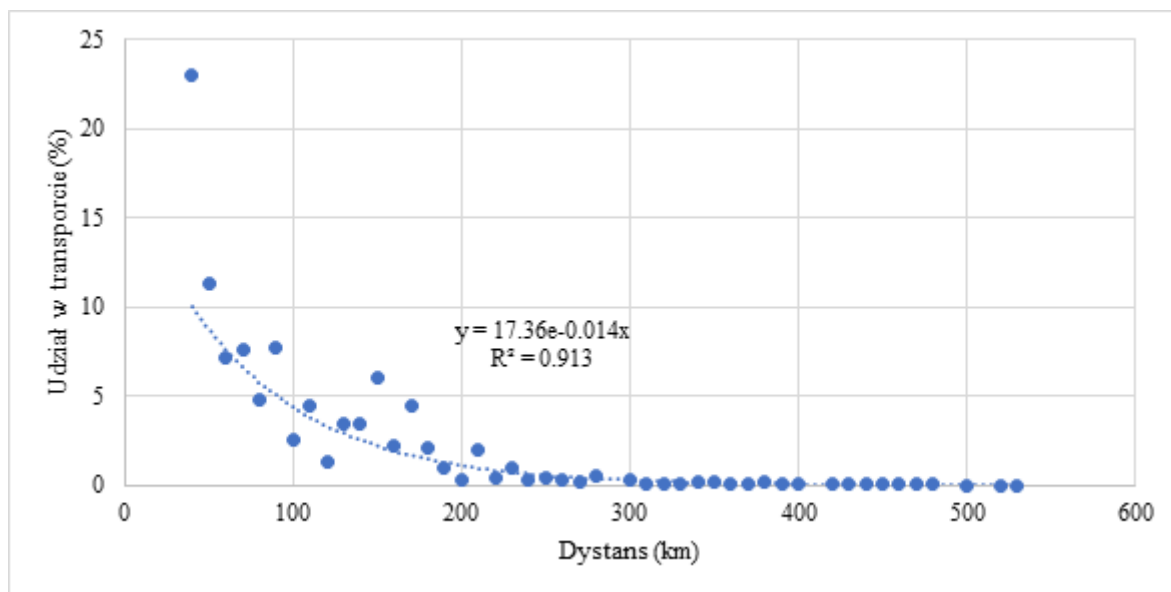
Masa zespołu pojazdów	Masa zespołu pojazdów MC (40Mg) - masa zespołu pojazdów	Pojemność	Różnica między rzeczywistą objętością a maksymalną objętością 25 m <sup>3</sup>	Różnica między rzeczywistą objętością a maksymalną objętością 27 m <sup>3</sup>		
		m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup>	%
Min	17895	24,18	-0,82	-3,27	-2,82	10,44
średnia	20243	27,36	2,36	9,42	0,36	1,32
Max	21390	28,91	3,91	15,6	1,91	7,06
V	689352	1,26	1,26	2	1,26	17,27
DS,	830,27	1,12	1,12	20,1	1,12	4,16

Zródło: opracowanie własne dla gęstości drewna sosnowego 740 kg/m<sup>3</sup>

Tabela 6. Masa zespołu pojazdów bez samozaładowczej ładowarki do drewna w 2020 r.

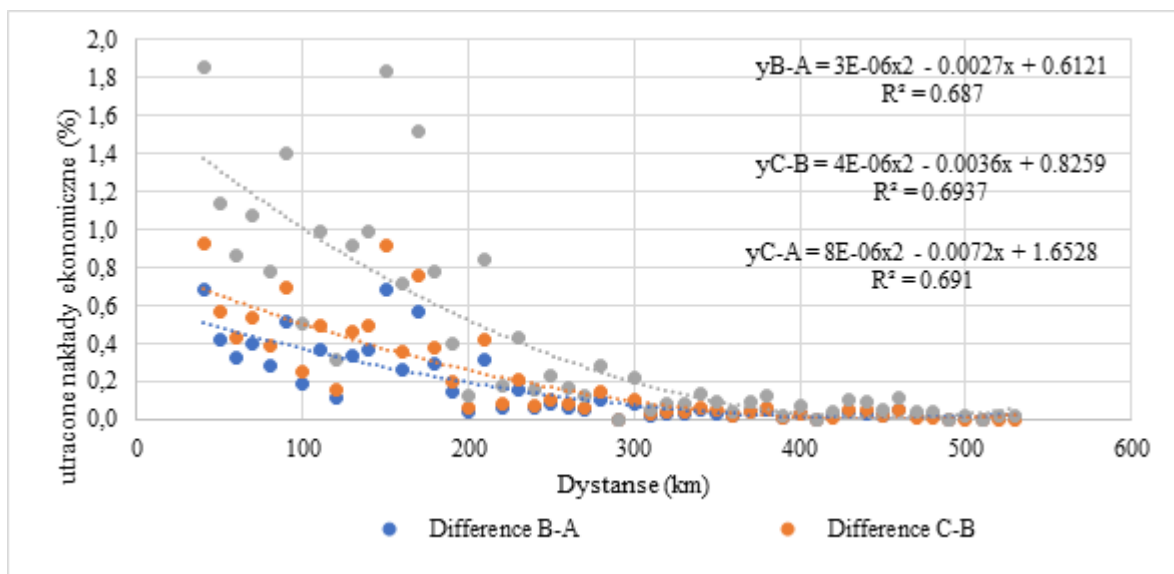
Masa zespołu pojazdów	Masa zespołu pojazdów MC (40Mg) - masa zespołu pojazdów	Pojemność	Różnica między rzeczywistą objętością a maksymalną objętością 30 m <sup>3</sup>	Różnica między rzeczywistą objętością a maksymalną objętością 27 m <sup>3</sup>		
		m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup>	%
Min	21575,00	29,16	-0,84	-2,82	2,16	7,98
średnia	23937,59	32,35	2,35	7,83	5,35	19,81
max	28650,00	38,72	8,72	29,05	11,72	43,39
V	3588422,24	6,55	6,55	72,81	6,55	89,89
DS,	1894,31	2,56	2,56	8,53	2,56	9,48

W analizach wskazano maksymalny zasięg dostaw w oparciu o wykazane odbiory drewna (dostawy surowca oznaczono w odstępach co 10 km). Dane pochodziły z dokumentów przewozowych dostaw surowca iglastego sosnowego o przyjętej gęstości 740 kg/m<sup>3</sup>. Ponieważ firmy transportowe wykorzystują pojazdy o zadeklarowanej ładowności 25 m<sup>3</sup>, które są wyposażone w dodatkowy sprzęt załadunkowy (hydraulic truck crane) lub bez urządzeń załadunkowych o standardowym załadunku objętości 30 m<sup>3</sup> drewna, dlatego w obliczeniach zasymulowano dostawy dla pojazdów o dwóch objętościach załadunku oraz o wartości średniej 27 m<sup>3</sup>. Wyniki wskazują na wpływ dystansu przewozu surowca na optymalizację wykorzystania środków transportu oraz potencjalną liczbę cykli transportowych (Ryc. 4).



Rycina 4. Rozkład odległości transportowanego drewna w 2022 r. (Staluna i in. 2023)

Liczba przejazdów niezbędnych do przewiezienia 1mln m<sup>3</sup> surowca drzewnego została obliczona z poziomu danych uwzględniających przepisy ustawy o ruchu drogowym oraz dotyczące maksymalnej dopuszczalnej objętości drewna sosnowego przewożonego w ramach jednego przejazdu. Wskazano maksymalny zasięg dostaw w oparciu o odbiory drewna w następującej strukturze: A- objętość załadunkowa 25 m<sup>3</sup>; B – objętość załadunkowa 27 m<sup>3</sup>; C- objętość załadunkowa 30 m<sup>3</sup> (dostawy w odstępach co 10 km). Dane w obliczeniach zasymulowano z uwzględnieniem rzeczywistych udziałów dostaw realizowanych dla pojazdów o wskazanych objętościach załadunku, co pokazuje wpływ wielkości załadunku na liczbę cykli transportowych. Jak wynika z opracowania, to różnice kosztów paliwa wynikające z niedoszacowania objętości załadunkowej pojazdów stanowią znaczny udział w całkowitych kosztach paliwa w skali roku. Koszty utraconych korzyści (koszty alternatywne) wynikające z braku wykorzystania DMC (Dopuszczalna Masa Całkowita) pojazdów w grupie analizowanego załadunku 25 m<sup>3</sup> na auto o możliwości do 27 m<sup>3</sup> stanowią sumarycznie 7,58%, a wykorzystanie aut o DMC pozwalającej na załadunek do 30 m<sup>3</sup> z załadunkiem do 27 m<sup>3</sup> stanowi potencjalnie 9,96%. Najwyższy poziom tych kosztów odnosi się do wykorzystania aut o DMC pozwalającej na załadunek 25 m<sup>3</sup> przy alternatywie załadunku drewna sosnowego na auta o objętości załadunkowej do 30 m<sup>3</sup>, co stanowi łącznie 20,16% utraconych kosztów zużycia paliwa (Ryc. 5).



Rycina 5. Rozkład kosztów utraconych korzyści w transporcie 1 mln m<sup>3</sup> surowca dla badanych odległości w 2022 r. Źródło: opracowanie własne. A - pojazdy do 25 m<sup>3</sup>; B - pojazdy do 27 m<sup>3</sup>; C - pojazdy do 30 m<sup>3</sup>.

W analizie statystycznej badanych zależności rzeczywistych i potencjalnych środków finansowych pozwalających na redukcję kosztów paliwa wskazuje się na istotność czynnika doboru zespołów pojazdów w ocenie pokonywanego dystansu. Weryfikacja testem ANOVA wskazuje na istotną zależność kosztu paliwa od masy załadunkowej pojazdów (Tab. 7).

Tabela 7. Wpływ ANOVA wielkości selekcji procesu na wskaźnik wydajności transportu kłód (p < 0,05)

Podsumowanie wyników				
	Warianty			Total
	A	B	C	
$\sum X$	3245723	2999832	2701108	8946663
Mean	32457,23	29998,32	27011,08	29822,21
$\sum X^2$	540293390499	462830516510	374986549614	1378110456623
Std. Dev.	66282,6982	61368,2868	55233,8194	60964,9604
Rezultaty				
Źródło	SS	df	MS	
Między wariantami	1487679700,9399	2	743839850,47	F = 0,19906
W obrębie wariantów	1109813514136,83	297	3736745838,8446	
Ogółem	1111301193837,77	299		

„SS” - zmienność, »df« - liczba niezależnych wyników i »MS« - wariancja międzygrupowa.

Ustalona wartość F wynosi 0,19906. Wynik jest istotny na poziomie p < 0,05. Z kolei procedura HSD Tukey'a obejmuje porównywanie parami w ramach danych ANOVA. Statystyka F wskazuje, że istnieje ogólna różnica między średnimi z próby. Test HSD Tukeya pozwala określić, że występuje różnica między parami średnich testów transportu B i C

i nieznaczny poziom różnicy między A i B. Natomiast istnieje znacząca różnica dla pary A i C (Tab. 8).

Tabela 8. Porównania parami wariantów procesu transportu z testem Tukeya

Para wariantów		HSD <sub>0,05</sub> = 20363,2685	Q <sub>0,05</sub> = 3,3312
A:B	Ma = 32457,23	2458,91	Q = 0,40
	Mb = 29998,32		
A:C	Ma = 32457,23	5446,15	Q = 0,89
	Mc = 27011,08		
B:C	Mb = 29998,32	2987,24	Q = 0,49
	Mc = 27011,08		

Uzyskane wyniki pozwalają na dokonanie oceny statystycznej wpływu objętości załadunkowej kołowych zespołów pojazdów transportowych przy średnim spalaniu 29 l/100 km i cenie za 1 litra ON na poziomie 1,41 EUR, co daje średnio 40,89 EUR na dystansie 100 km w analizowanym roku 2022 (Tab. 9).

Tabela 9. Wpływ wyboru środka transportu na średni poziom kosztów paliwa (olej napędowy = 1,41 EUR/l)

	Całkowity koszt	Typ transportu			Koszt transportu			Różnica			Różnica				
		A 25m <sup>3</sup>	B 27m <sup>3</sup>	C 30m <sup>3</sup>	A 25m <sup>3</sup>	B 27m <sup>3</sup>	C 30m <sup>3</sup>	B-A	C-B	C-A	B-A	C-B	C-A		
EUR	pcs	EUR			EUR			EUR			%				
Sum	40000	37013	33316	3245537	299962	270091	-	-	-	2459	29871	54462	7,5	9,9	20,1
Mean	233,07	800	740	666	64911	59992	54018	-4918	-5974	10892	5	0	0,1	0,2	0,40
Max	433,43	9200	8518	7666	300950	278641	250770	2230	-27870	50180	9	3	0,6	0,9	1,86
DS	118,02	1572	1456	1310	81194	75217	67689	5978	7528	13505	8	5	0,1	0,2	0,50
V	139,27,69	247383	212090	171777	65925174	565757	458180	3573	56673	18239	3	0,0	0,0	0,0	0,25
	5	3	4	03	2914	3007	8606	160	7912	3	6	0,25			

Z punktu widzenia aspektów środowiskowych, istotnym parametrem oprócz ilości zużycia paliwa, a więc także kosztów tego paliwa, jest poziom emisji CO<sub>2</sub> oraz możliwość jego redukcji. W tabeli 10 zestawiono różnice zużycia ON jakie wynikają ze sposobu załadunku rozważanych typów pojazdów transportowych oraz wpływ takich działań na redukcję CO<sub>2</sub>.

Tabela 10. Poziom emisji CO<sub>2</sub> i jego redukcja w zależności od doboru zestawów pojazdów (emisja 2,68 kg CO<sub>2</sub> z 1l oleju napędowego) (Stanula i in. 2023)

Zużycie oleju napędowego	Zużycie oleju napędowego na transport 1 mln m <sup>3</sup> drewna sosnowego (litr)			Redukcja zużycia oleju napędowego (litr) Różnica Redukcja emisji CO <sub>2</sub> (kg)			Redukcja emisji CO <sub>2</sub> (kg)		
	A 25 m <sup>3</sup>	B 27 m <sup>3</sup>	C 30 m <sup>3</sup>	B-A	C-B	C-A	B-A	C-B	C-A
25l/100k m	1984310	1833960	1651330	150350	0	0	8	8	892386
29l/100k m	2301800	2127394	1915543	174406	1	7	8	0	8
33l/100k m	2619289	2420827	2179756	198462	2	4	8	2	0
Różnica %							7,1	9,9	20,2

W statystyce ANOVA wpływu spalania ON na emisję CO<sub>2</sub> wskazano istotną zależność tego czynnika przy  $p < 0,05$ .

W teście ANOVA wartość F wynosi 0,45057. Wynik oceny zależności emisji CO<sub>2</sub> od zużycia ON jest istotna przy  $p < 0,05$  wskazując w teście Post Hoc Tukey HSD na silną zależność porównania spalania w teście załadowczym A i teście załadowczym C emisji CO<sub>2</sub> przy redukcji zużycia paliw ON na 100 km (Tab. 11).

Tabela 11. Porównania parami wariantów procesów transportowych z testem Tukeya

Para wariantów		HSD <sub>0,05</sub> = 15758,7649	Q <sub>0,05</sub> = 3,3312
A:B	Ma = 19843,10 Mb = 23019,04	3175,94	Q = 0,67
A:C	Ma = 19843,10 Mc = 26193,99	6350,89	Q = 1,34
B:C	Mb = 23019,04 Mc = 26193,99	3174,95	Q = 0,67

Redukcja CO<sub>2</sub> wynika z uwzględnienia ograniczenia cykli transportowych. Przekłada się na rzeczywiste zmniejszenie ilości paliw kopalnych zużytych w procesie transportu kołowego a jednocześnie ogranicza szkodliwą emisję CO<sub>2</sub> do atmosfery. Wartość redukcji wynika z poziomu jakości spalania i zgodnie z rozkładem zapotrzebowania, przy zużyciu oleju napędowego w zakresie 25-33 l na 100 km, może stanowić redukcję CO<sub>2</sub> od 7 do 20%. Tak znaczna ilość zredukowanego CO<sub>2</sub> (od 402938 do 1177950 kg CO<sub>2</sub>) dotyczy transportu 1 mln m<sup>3</sup> surowca drzewnego w zależności od spalania tj. 25 lub 33 l/100 km, co daje średnio 29 l/100 km.

Publikacja 4

Górna A., Wieruszewski M., Szabelska-Beręsewicz A., **Stanula Z.**, Adamowicz K. Biomass price prediction based on the example of Poland. *Forests*. 2022, vol. 13 (issue 12), art. no. 2179; DOI: 10.3390/f13122179,

Biomasa przemysłowa, czyli produkt uboczny procesu technologicznego obróbki drewna jest wykorzystywana najczęściej w celach energetycznych bądź jako surowiec do produkcji płyt drewnopochodnych i celulozy.

Przeanalizowano zmiany cen dla poszczególnych grup kwalifikujących się jako produkty uboczne przerobu drewna okrągłego. Największy wzrost cen wystąpił w przypadku trocin/wiór, natomiast najmniejsza zmiana dotyczyła zrębek papierniczych. W latach 2017-2022 cena zrębki papierniczej wzrosła o ok 108%; zrębki tartacznej ok 116%; kory sosnowej ok 112%, natomiast dla trocin i wiór zanotowano największy wzrost ceny, to jest o około 167% (Górna i in. 2023). Zestawiono ze sobą ceny rzeczywiste oraz prognozowane w celu identyfikacji błędów, które wynikały z zastosowanej metody predykcji oraz określono ich poziom (Tab. 12 i 13).

Tabela 12. Zestawienie MAE, MAPE i RMSE dla prognozy z wykorzystaniem ARIMA

	Zrębki papiernicze			Zrębki tartaczne			Kora So			Trocin i Wióry		
	MAE	MAP E [%]	RMS E	MAE	MAP E [%]	RMS E	MA E	MAP E [%]	RMS E	MAE	MAP E [%]	RMS E
październik 2022	44,27	11,07	6,65	46,56	11,64	3,41	20	6,67	4,47	13,47	2,45	3,67
listopad 2022	75,68	18,92	8,70	63,49	15,87	3,98	20	6,67	4,47	27,13	4,93	5,21
grudzień 2022	121,7	32,91	11,04	130,4	37,26	6,10	20	6,67	4,47	157,2	34,95	12,54

MAE (Średni bezwzględny błąd), MAPE (Średni bezwzględny błąd procentowy), oraz RMSE (root-mean-square deviation):

Tabela 13. Zestawienie MAE, MAPE i RMSE dla prognozy z wykorzystaniem WH

	Zrębki papiernicze			Zrębki tartaczne			Kora So			Trocin i Wióry		
	MAE	MAP E [%]	RMS E	MAE	MAP E [%]	RMS E	MA E	MAP E [%]	RMS E	MA E	MAP E [%]	RMS E
październik 2022	26,2	5	6,56	5,12	14,87	3,72	3,86	18,4	9	6,16	4,30	77,8
listopad 2022	46,8	7	11,72	6,85	15,97	3,99	4,00	28,5	5	9,52	5,34	51,5
grudzień 2022	93,9	3	25,39	9,69	104,1	2	29,75	10,20	42,4	14,13	6,51	95,4

Wykonane zestawienie błędów dla obu metod pokazują zróżnicowanie w wynikach. RMSE uzyskane przy wykorzystaniu dwóch metod są bardzo bliskie, czyli można stwierdzić, że metody dają podobną efektywność predykcji.

#### Publikacja 5

Górna A., Szabelska-Beręsewicz A., Wieruszewski M., Starosta-Grała M., **Stanuła Z.**, Kozuch A., Adamowicz K. Predicting post-production biomass prices. *Energies*. 2023, vol. 16 (issue 8), art. no. 3470, DOI: 10.3390/en16083470

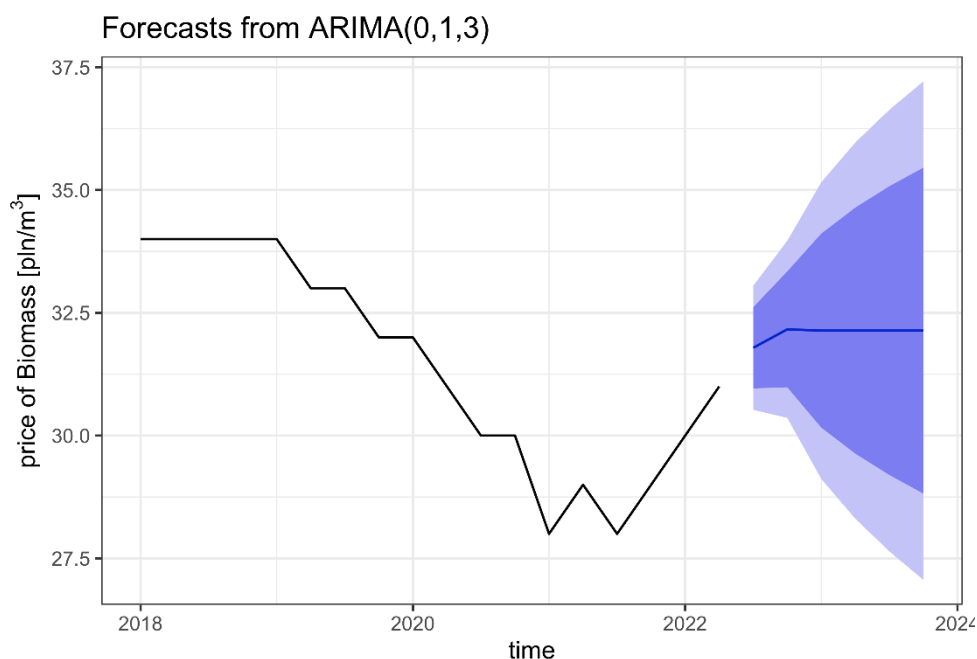
W trakcie analizy danych zmienności cenowej biomasy drzewnej dokonano przyporządkowania odpowiednich parametrów  $p$ ,  $d$ ,  $q$  dla metody ARIMA. W ocenie ekonomicznych czynników wpływających na element predykcji, użyto modelu ARIMA (0, 2, 0) (Tab. 14).

Tabela 14. Prognoza ceny sortymentu M2 ZE dla III kw. 2022, IV kw. 2022 oraz I kw. 2023, Źródło: Opracowanie własne na podstawie pozyskanych danych z Systemu informatycznego lasów państwowych (SILP)

Czas	Prognoza punktowa [pln/m <sup>3</sup> ]	Lo 80 [pln/m <sup>3</sup> ]	Hi 80 [pln/m <sup>3</sup> ]	Lo 95 [pln/m <sup>3</sup> ]	Hi 95 [pln/m <sup>3</sup> ]
2022 Q3	131	120,83	141,17	115,45	146,55
2022 Q4	172	149,26	194,73	137,23	206,77
2023 Q1	213	174,95	251,04	154,82	271,18

\*przedziały predykcji ustalone na poziomie 80% i 95%

Wartości prognozy dla dostępnych na rynku sortymentów drzewnych docelowej wartości predykcyjnej (Ryc. 6), mają tendencję wzrostową. Jest to duży wzrost ceny w porównaniu z rokiem 2021. Porównując ceny drewna w okresie pierwszych dwóch kwartałów w roku 2022, które ekstremalnie wzrosły, przewidywany jest wzrost poziomu dla kolejnych lat. Poziom cen dla drobnicy M2 od roku 2018 nie podlega drastycznym zmianom. Mały spadek zanotowano na przełomie IV kwartału 2020 roku oraz I kwartału 2021 roku. Linię trendu można uznać jako stabilny poziom wartości sortymentu M2.



Rycina 6. Prognoza ceny sortymentu M2 dla III kw. 2022, IV kw. 2022 oraz I kw. 2023.  
Źródło: Opracowanie własne na podstawie pozyskanych danych z Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP)

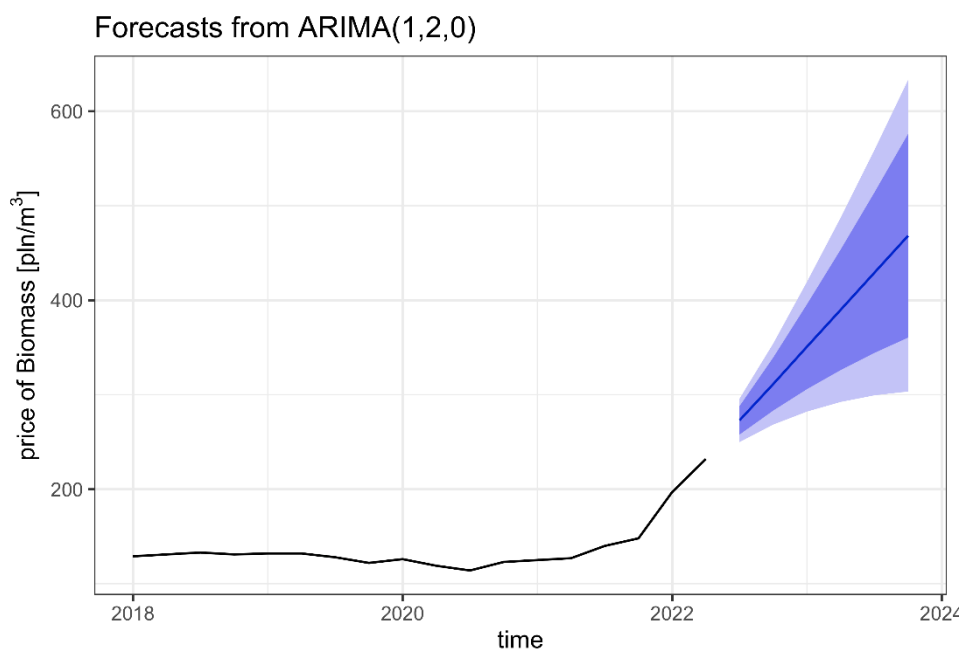
Tabela 15. Prognoza ceny sortymentu M2 dla III kw. 2022, IV kw. 2022 oraz I kw. 2023.  
Źródło: Opracowanie własne na podstawie pozyskanych danych z Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP)

Czas	Prognoza punktowa [pln/m <sup>3</sup> ]	Lo 80 *[pln/m <sup>3</sup> ]	Hi 80 * [pln/m <sup>3</sup> ]	Lo 95 * [pln/m <sup>3</sup> ]	Hi 95 * [pln/m <sup>3</sup> ]
2022 Q3	31,79	30,96	32,61	30,52	33,05
2022 Q4	32,16	30,98	33,34	30,35	33,97
2023 Q1	32,14	30,16	34,11	29,12	35,15

\*przedziały predykcji ustalone na poziomie 80% i 95%

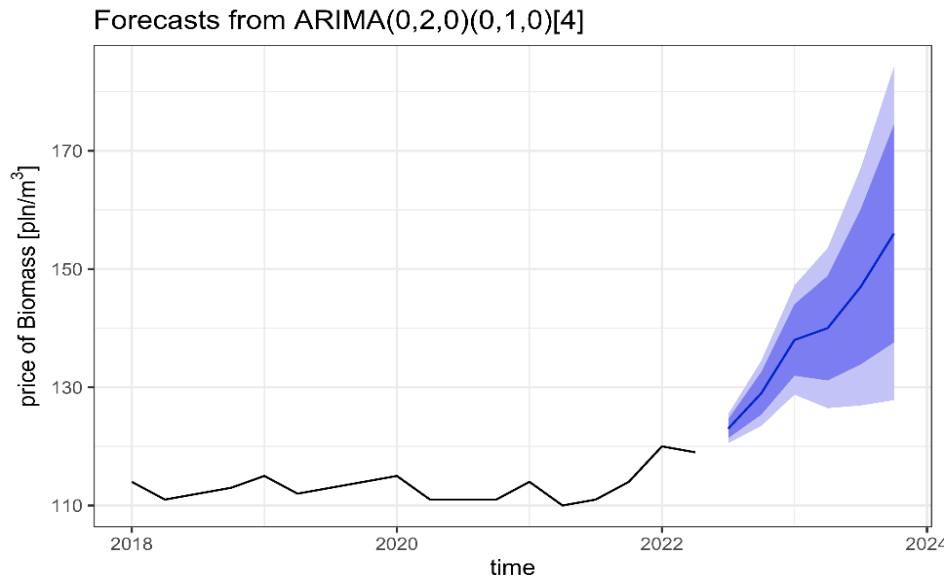
Analizując stworzoną prognozę dla drobnicy M2 można stwierdzić stabilność poziomu ceny między analizowanymi kwartałami 2022-2023 roku. Różnice pomiędzy kwartalnymi cenami wahają się między 0,30 pln a 0,40 pln.

Analizując rycinę 7 można zauważyć wzrost ceny drewna stosowego ogólnego przeznaczenia od IV kwartału 2021 roku. Porównując poziom cen w okresie od I kwartału 2018 roku do II kwartału 2022 roku, cena uległa wzrostowi o ponad 100 %. Największy wzrost nastąpił w IV kwartale 2021 roku.



Rycina 7. Prognoza ceny sortymentu S2AP dla III kw. 2022, IV kw. 2022 oraz I kw. 2023. Źródło: Opracowanie własne na podstawie pozyskanych danych z Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP)

Analiza wartości cen dla drewna opałowego ma charakter sezonowy. Wzrost poziomu cen następuje w kwartałach IV i I kolejnych lat. Okres ten obejmuje miesiące jesienno-zimowe, gdzie następuje wzmożony popyt na drewno opałowe. Jednakże należy zwrócić uwagę na duży wzrost ceny w III kwartale 2021 roku i dalszy ciąg tej sytuacji w I kwartale 2022 roku. Różnica pomiędzy najwyższą ceną w I kwartale 2021 roku a I kwartale 2022 roku wynosi 5%, to jest zdecydowanie więcej niż pomiędzy wcześniejszymi latami (Ryc. 8).



Rycina 8. Prognoza ceny sortymentu S4 dla III kw. 2022, IV kw. 2022 oraz I kw. 2023. (Opracowanie własne na podstawie pozyskanych danych z Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP))

Prezentowane analizy zmienności cenowej i predykcji w zakresie surowca drzewnego stanowią także odniesienie do zachowania modelu ekonomicznego w przypadku drewna do przerobów mechanicznych. Wskaźniki zmian oczekiwanej wartości surowca drzewnego mają bezpośredni wpływ na oczekiwane efekty ekonomiczne przedsiębiorstw drzewnych w zakresie płytkich (opartych wyłącznie na przetarciach do postaci tarcicy ogólnego przeznaczenia) i głębokich (z uwzględnieniem obróbki termicznej i prefabrykacji z założeniem wytworzenia wyrobów gotowych) przerobów. Jakość i cena sortymentów drzewnych wpływa bezpośrednio na uzyskiwane wyniki jakościowe i wydajnościowe przetarc.

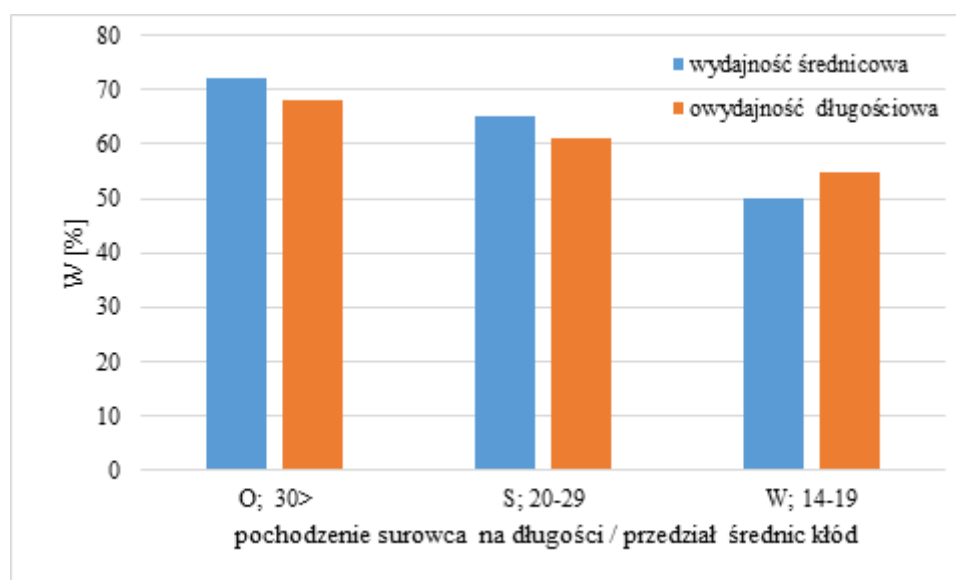
#### Publikacja 6

**Stanula Z., Wieruszewski M., Dynowska J., Adamowicz K.** Comparative efficiency of roundwood processing into pallet lumber. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2024, Vol. 66 (4), 310–316, w publikacji, DOI: 10.2478/ffp-2024-0023,.

#### 6.5. Efektywność i wartość dodana przerobu w odniesieniu do jakości surowca

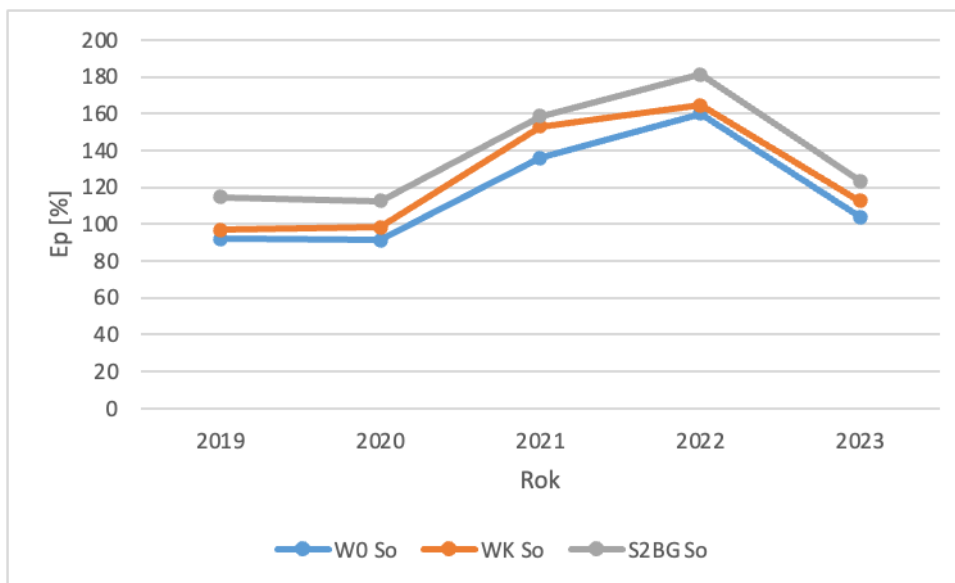
W analizie efektywności produkcji stanowiącej element obiegu zamkniętego wzięto pod uwagę warunki technologiczne, a także fakt zróżnicowania wymiarowego i jakościowego drewna okrągłego oraz aktualne raporty dotyczące cen (<https://www.drewno.pl/>, <https://www.e-drewno.pl/stock/>), określono średnią wydajność przerobu drewna sosnowego

(Ryc. 5) na tarcicę paletową w małych i średnich zakładach produkujących tarcicę ogólnego przeznaczenia oraz dokonano analizy efektywności produkcji w oparciu o wzory [Stanula i in. 2024]. Uśredniona wielkość wydajności przyjęta dla dalszych analiz to 60% gdzie zmiany cen transportu drewna określona w wyniku ankiet, w latach 2019 - 2023 oscyływały średnio na poziomie 28; 30; 33; 38; 35 zł/m<sup>3</sup> (Ryc. 9). Można stwierdzić, że niezależnie od rodzaju zakładu, najlepszą wydajność można uzyskać przetwarzając kłody dolne o większych średnicach (68-72%), a najniższą wydajność potwierdzono podczas obróbki kłód górnych o małych średnicach (50-55%). Generalnie ta prawidłowość kształtowała relacje cenowe dla surowca i tarcicy na rynku krajowym, ale głównie do tego ograniczone są materiały źródłowe (EN 1611-1:1999/A1:2002).

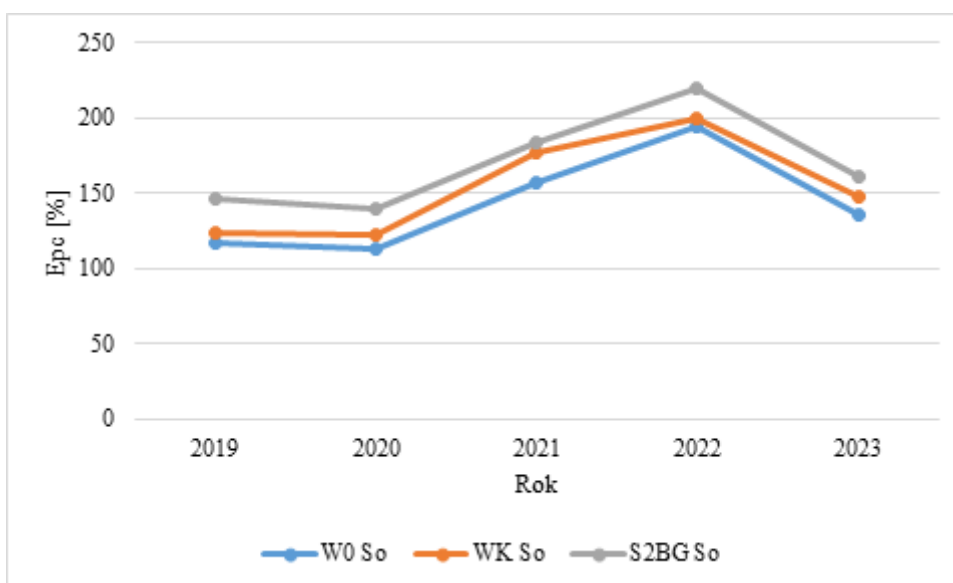


Rycina 9. Wydajność technologiczna W przerobu drewna iglastego na tarcicę półfabrykatową w tartakach (Hruzik i in. 2005, Mydlarz i Wieruszewski 2022, Wieruszewski i in. 2020, Stanula i in. 2024)

Efektywność przerobu drewna (Ryc. 10) można również rozpatrywać na przykładzie konkretnych sortymentów wyrobów gotowych paletowych. Efektywności produkcji wybranych elementów sosnowych na wyroby paletowe wykonane w roku 2022 (Ryc. 11) wskazuje, że produkcja asortymentów pozwala na uzyskanie efektywności średniej w  $E_p=101-168\%$  przy podobnym materiale i wydajność przetarcia w przedziale  $W=50-72\%$  (przyjęte średnie 60%)



Rycina 10. Efektywność Ep przerobu wybranych sortymentów dla produkcji tarcicy paletowej (Stanula i in. 2024)



Rycina 11. Efektywność całkowita Epc z uwzględnieniem produktów ubocznych przy produkcji tarcicy paletowej (Stanula i in. 2024)

Wpływ cen rynkowych związany z produktami ubocznymi wpływa znacząco na wartość dodaną i wskaźnik efektywności przerobu. Dotyczy to szczególnie produktów kawałkowych zrębki oraz trocin. Przekłada się to na dodatkowy element wskaźnika wpływu ekonomicznego, w postaci wskaźnika Epc efektywności całkowitej.

Potencjalny zakres średniej wydajności materiałowej przetarc porównany jest ze wskaźnikiem ekonomicznym utworzonym przez relację cen surowców i produktów nie będzie się różnił od poziomu wydajności uzyskiwanego w fabrykach wykorzystujących tradycyjne

technologie, ponieważ relacja ta nie jest kształtowana przez rynek lokalny, ale rynek globalny. Wartości Efektywności produkcji Ep wybranych asortymentów paletowych w ostatnich latach stopniowo rosły z poziomu ok. 91% do 180% w 2022 roku by zacząć gwałtownie spadać z dekoniunkturą w 2023. Wartością dodaną procesu jest efekt efektywności Epc wykorzystania produktów ubocznych. Podobnie jak dla tarcicy zależy on od wahań cen rynkowych. W strukturze odniesienia do ceny surowca najwyższe wzrosty wskaźnika uzyskuje przerób drewna S2B\_G gdzie w latach 2019 – 2021 z poziomu 31% spadł do 25%. Dodatkowy wzrost wskaźnika efektywności produktów ubocznych znacząco wzrósł w 2022 roku do poziomu 33-38%, by utrzymać się na podobnym poziomie w 2023 roku. Sumarycznie pozwoliło to na osiągnięcie efektywności całkowitej przerobów Epc surowca sosnowego na tarcice paletową na poziomie 194-220% w 2022 roku ze spadkiem w 2023 do 135-161%. Wskazuje to jak znaczące jest racjonalne zagospodarowanie produktów ubocznych w procesie przetarcia.

Wartość dodana w działalności gospodarczej osiągnięta przy przerobie drewna określa się wartością przychodów ze sprzedaży minus wartość przeniesiona, wypracowana w innych, poprzedzających procesach przetwarzania surowców i materiałów. Wartości dodane osiągnięte w rozpatrywanej fazie przerobu drewna mogą również stanowić podstawę określania struktury wykorzystania drewna okrągłego, bowiem w analizach w makroskali wartości te składają się na ten podstawowy miernik poziomu rozwoju gospodarczego. Wysoka wartość dodana, wypracowana w przedsiębiorstwie ulega podziałowi między pracowników, budżet, finansowanie składek obciążających koszty osobowe, rozliczne obowiązkowe świadczenia, a co najważniejsze z punktu widzenia podmiotu gospodarczego – zysk netto. Jednakowoż uwzględnienie wartości dodanej w rachunku zagospodarowania drewna nie zapewni w pełni trafnego ustalenia struktury zapotrzebowania na poszczególne sortymenty w odróżnieniu od wartości drewna. Do wartości drewna z dużą pewnością podążać będzie przyszła struktura cen surowca, co rzecz jasna należałoby ustalić w dalszych pracach nad modelem. Mierniki wartości drewna okrągłego, wartości dodanej w przerobie, jak również wskaźniki efektywności mogą być zatem wykorzystane w proponowanej metodzie rachunku zagospodarowania surowca stanowiąc funkcje kryterium ekonometrycznego.

Można zatem uznać, iż kryterium wartości drewna będzie głównym czynnikiem kształtującym zmiany zapotrzebowania na drewno okrągłe różnych sortymentów jakościowo wymiarowych i gatunków limitujące ich wzrost. Maksymalizację funkcji celu ogranicza jednak szereg mniej lub bardziej istotnych warunków dających się opisać stosownymi równaniami. Do najważniejszych należą:

- podaż poszczególnych sortymentów i gatunków drewna,
- popyt na drewno.

Podaż drewna okrągłego jest określona przez oferujące je gospodarstwa leśne, a w przypadku Polski głównie Lasów Państwowych, zaś popyt wynika z potrzeb rynku materiałów i półfabrykatów oraz wyrobów z drewna. Związany jest on również z poziomem technologicznym i zdolnością przerobu dla poszczególnych branż i przedsiębiorstw.

Potrzeba racjonalnego zagospodarowania drewna, również w ujęciu ilościowym wraz z prognozami, jest wskazywana jako najważniejszy element współpracy leśno - drzewnej przez środowiska drzewiarzy, jak również organy centralne. Oznacza to potrzebę ścisłej kontroli przepływu w ramach gospodarki krajowej.

Można oczekiwać, iż rynek drzewny w pewnej mierze ukształtuje opłacalną strukturę wykorzystania drewna, choć nie można pomijać istotnego wpływu polityki Lasów Państwowych realizujących zrównoważone cele utrzymywania drzewostanów.

## 7. DYSKUSJA

W kontekście rosnącego zapotrzebowania na drewno oraz zmieniających się warunków polityczno-ekonomicznych w Europie, obrót drewnem okrągłym nabiera szczególnego znaczenia zarówno pod względem ekonomicznym, jak i ekologicznym. W 2020 roku europejska produkcja surowca drzewnego wynosiła 488 milionów m<sup>3</sup> (Raihan 2023). Co istotne, produkcja a w ślad za nią zapotrzebowanie na drewna okrągłego w UE stopniowo rośnie. Średni europejski wzrost w latach 2000 -2022 wynosił 26% (Janáková Sujová i in. 2023). Polska jest znaczącym producentem surowca drzewnego w UE. Wprawdzie analiza skupień, przeprowadzona przez Koulelisa (2009), klasyfikuje Polskę w grupie krajów o średniej produktywności zarówno w kategorii drewna iglastego, jak i liściastego, jednak podkreśla istotne znaczenie polskiego sektora leśnego w kontekście europejskiej gospodarki opartej na drewnie. Polska, dzięki swoim rozległym zasobom leśnym i zrównoważonemu podejściu do gospodarki leśnej, przyczynia się nie tylko do wzrostu produkcji drewna, ale także do promocji zrównoważonego zarządzania lasami w całej Unii. Obrót drewnem okrągłym w Polsce odgrywa istotną rolę zarówno w kontekście ekonomicznym, jak i ekologicznym. Polska, posiadająca istotne zasoby leśne w Europie, historycznie była świadkiem znaczących zmian w wykorzystaniu tych zasobów. Miały na to wpływ zarówno działalności człowieka, jak i zmian politycznych oraz gospodarczych.

W przeszłości gospodarka leśna często charakteryzowała się nadmierną eksploatacją zasobów, co wynikało z wysokiego zapotrzebowania na drewno, potrzeb budowlanych oraz eksportu (Jędrzejewski 2019).

Współczesne podejście do gospodarki leśnej w Polsce stara się równoważyć potrzeby ekonomiczne z wymaganiami ochrony środowiska. Z jednej strony, sektor drzewny nadal stanowi ważny element gospodarki narodowej, generując znaczne przychody i miejsca pracy, z drugiej strony, coraz większy nacisk kładzie się na zrównoważony rozwój, ochronę bioróżnorodności oraz minimalizowanie negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Zatem zarządzanie lasami i obrotem drewnem w Polsce, podobnie jak w całej Europie, musi uwzględniać zarówno wyzwania ekonomiczne, jak i ekologiczne wynikające ze zmieniających się warunków globalnych i polityki zrównoważonego rozwoju. Jak wskazuje Raihan (2023), ekosystemy leśne stają się coraz bardziej narażone na ekstremalne zdarzenia klimatyczne i inne zagrożenia, co ma istotne konsekwencje ekonomiczne i ekologiczne. W odpowiedzi na te wyzwania, zrównoważone praktyki leśne nie tylko chronią gatunki i siedliska, ale także wspierają gospodarkę o obiegu zamkniętym, zwiększając produkcję drewna i minimalizując emisje dwutlenku węgla. Polska, dzięki swoim zasobom leśnym, odgrywa kluczową rolę w europejskim rynku drewna i wyrobów z drewna.

W Polsce przetwarza się obecnie ok. 40 mln m<sup>3</sup> drewna w ciągu roku, z czego tartaki przerabiają ok. 25 mln m<sup>3</sup> (Statistical Yearbook, 2022). Najbardziej popularnym i najczęściej przetwarzanym surowcem drzewnym jest sosna. Stanowi ona ok. 61% przetwarzanego surowca. Pozostałe gatunki to: świerk 5,6%, jodła 4,4%, buk 6,9%, dąb 6,6%, brzoza 4,7% i inne stanowiące łącznie 10,8% (Statistical Yearbook, 2022). Uwzględniając wielkość przerobu drewna przez tartaki coraz częściej wskazuje się na właściwe wykorzystanie powstających drzewnych produktów ubocznych tzw. biomasy drzewnej przemysłowej. Należy podkreślić, że pomimo stosowania coraz to bardziej surowcowo oszczędnych technologii rośnie zapotrzebowanie na surowiec drzewny. Jak podają Sjølie i in. (2025) w Norwegii zapotrzebowanie na drewno konstrukcyjne oraz produkty bioenergetyczne będzie rosło, co może przełożyć się na zwiększony popyt na surowiec drzewny, w tym drewno okrągłe. Ich badania wykazały, że menedżerowie przemysłu tartaczno-przemysłowego przewidują wzrost popytu na drewno konstrukcyjne i bioenergię, a jednocześnie oczekują wzrostu produktywności przemysłu tartaczno-przemysłowego oraz handlu międzynarodowego. Jak wynika z badań przeprowadzonych w południowo-wschodnich Stanach Zjednoczonych, kluczowym czynnikiem kształtującym obrót surowcem drzewnym są wymagania polityczne oraz presja ze

strony organizacji pozarządowych, które wpływają na przyjęcie zrównoważonych praktyk pozyskiwania surowców. Zagadnienie to, na przykładzie produkcji pelletu drzewnego w USA, przedstawili Kittler i in. (2020). Zauważyli oni, że w miarę wzrostu zapotrzebowania na wyroby z drewna na znaczeniu zyskiwało zagadnienie oceny ryzyka związanego z ograniczoną dostępnością surowca. Podkreślili oni, że zmieniająca się percepcja społeczna w zakresie postrzegania funkcji lasów spowodowała, że dla rozwoju branży kluczowym staje się zapewnienie, że surowiec drzewny pozyskiwany jest w sposób minimalizujący negatywny wpływ na środowisko. Przemysł ten korzysta z różnych systemów certyfikacji, takich jak Program Zrównoważonej Biomasy, który opiera się na podejściu opartym na ryzyku, aby zapewnić zgodność z europejskimi wymogami dotyczącymi zrównoważonego rozwoju. W Polsce, podobnie jak w USA, sektor drzewny stoi przed wyzwaniami związanymi z dostosowaniem się do rosnących wymagań rynkowych i regulacyjnych dotyczących zrównoważonego zarządzania zasobami leśnymi. Analiza praktyk pozyskiwania drewna oraz struktur łańcucha dostaw może dostarczyć cennych informacji na temat strategii, które mogłyby zostać zastosowane w polskim kontekście. Należy uznać, że przyjęcie i dostosowanie systemów certyfikacji oraz metod oceny ryzyka mogłoby przyczynić się do poprawy praktyk zrównoważonego zarządzania lasami w Polsce.

Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia uznano, że właściwe omówienie struktury rynku drewna handlowego w Polsce oraz zidentyfikowanie różnic w zapotrzebowaniu na surowiec różnych sektorów przemysłu drzewnego pomaga zrozumieć, jak ceny i jakość drewna wpływają na rynek i jakie są ekonomiczne konsekwencje ich zmian dla różnych grup odbiorców. Istotne są badania zmierzające do wyznaczenia zapotrzebowania poszczególnych grup przemysłu drzewnego. Takie próby były już podejmowane. Przykładowo Walkiewicz i inni (2022) w sposób modelowy wyznaczyli strukturę przerobu tartaków oraz wskazali ilości powstających w nich produktów. Należy podkreślić, że również zrozumienie konfliktu interesów między różnymi sektorami przemysłu (np. energetycznym a producentami forniru), wynikające z możliwości wykorzystania drewna różnych klas jakości ilustruje wyzwania związane z optymalnym dopasowaniem podaży drewna do specyficznych potrzeb przemysłu. Dyskusja na temat jakości oferowanego drewna, szczególnie drewna wielkowymiarowego, oraz sposobu jego pozyskiwania (np. wykorzystanie harwesterów, co może prowadzić do uszkodzeń kłód) ma istotne znaczenie w kontekście ekologicznych aspektów gospodarki leśnej. Takie szczegóły pozwalają na lepsze zrozumienie, w jaki sposób praktyki gospodarki leśnej wpływają na jakość surowca oraz jego przydatność dla różnych zastosowań

przemysłowych, co ma bezpośrednie implikacje zarówno ekonomiczne, jak i ekologiczne. Mając to na uwadze do przygotowania niniejszej rozprawy wykorzystano wyniki badań (#1) dotyczące analizy rynku drewna w Polsce, zróżnicowania kategorii drewna handlowego, oraz wpływu na ekonomiczne i ekologiczne aspekty zarządzania tym surowcem.

Zgodnie z przyjętym kierunkiem zmian w XXI wieku poszukuje się rozwiązań zmierzających do realizacji wzrostu gospodarczego z jednoczesnym ograniczaniem negatywnego wpływu tego rozwoju na środowisko. Jednym z realizowanych kierunków działań w tym zakresie jest tzw. zielona logistyka. W opinii Dzwigola i in. (2021) jest ona skutecznym narzędziem transformacji systemów logistycznych w kierunku zrównoważonego rozwoju. Wdrożenie koncepcji zielonej logistyki może pomóc w minimalizacji kosztów zarządzania przepływem logistycznym oraz w utrzymaniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa środowiskowego, co jest jednym z ważnych wymogów dla wdrożenia koncepcji społecznej odpowiedzialności biznesu w gospodarce o obiegu zamkniętym. Analiza ekonomiczna i ekologiczna aspektów obrotu drewnem okrągłym w Polsce, uwzględniając wpływ wielu czynników nie może pominąć aspektów związanych z procesem dostaw surowca drzewnego do przedsiębiorstw, które je przetwarzają. Jak wskazano w badaniach Sieniawskiego i Portera (2012), efektywność zarządzania łańcuchem dostaw drewna jest kluczowym czynnikiem wpływającym na zrównoważony rozwój sektora leśnego w Polsce. Analiza łańcucha dostaw surowca wykazała, że takie czynniki jak odległość transportu, okna czasowe dla załadunku i rozładunku oraz liczba punktów zaopatrzenia mają istotny wpływ na sprawność systemu transportowego. Badania te przeprowadzono za pomocą dynamicznego modelu komputerowego, który pozwolił na symulację i optymalizację procesu dostaw drewna, co jest niezmiernie istotne w kontekście zrównoważonej gospodarki leśnej (Sieniawski i Porter, 2012).

W ostatnich latach coraz więcej firm wdraża praktyki zrównoważonego rozwoju w swoich łańcuchach dostaw, co jest motywowane rosnącą presją regulacyjną i oczekiwaniami interesariuszy. W odpowiedzi na te zmiany, badania koncentrują się na zrozumieniu, jak różne aspekty zrównoważonego rozwoju wpływają na wyniki finansowe i operacyjne firm. Govindana i in. (2020) przeprowadzili metaanalizę literatury, wykorzystując wyniki z różnych badań dotyczących wpływu praktyk zrównoważonego rozwoju w łańcuchu dostaw na wyniki firm. Dev i in. (2020) wykonali metaanalizę 167 efektów z 129 artykułów, aby ocenić, jak praktyki środowiskowe, społeczne i zintegrowane wpływają na wyniki operacyjne i finansowe firm. Ich badania potwierdziły, że istnieje pozytywna korelacja między praktykami zrównoważonego rozwoju a wynikami firm, przy czym siła tej relacji rośnie z czasem.

Stwierdzono, że zrównoważone praktyki mają silniejszy wpływ na wyniki firm w branżach produkcyjnych niż w usługowych. Należy tu podkreślić, że przemysł drzewny to niemal wyłącznie przedsiębiorstwa produkcyjne. Dodatkowo udowodniono, że związek między praktykami zrównoważonego rozwoju a wynikami firm jest silniejszy w krajach rozwijających się w porównaniu do krajów rozwiniętych. Cytowane badanie sugeruje, że inwestowanie w praktyki zrównoważonego rozwoju przynosi firmom długoterminowe korzyści, zarówno pod względem finansowym, jak i operacyjnym. Ponadto cytowane wyniki wskazują m.in., że firmy powinny skoncentrować się na zrównoważonym zarządzaniu łańcuchem dostaw, aby poprawić swoją efektywność operacyjną i zdobyć przewagę konkurencyjną.

Implementacja zrównoważonych praktyk w transporcie drewna okrągłego, takich jak optymalizacja tras i wykorzystanie niskoemisyjnych pojazdów, może przynieść korzyści operacyjne i finansowe, zmniejszając koszty i poprawiając efektywność całej branży. Firmy w sektorze drzewnym mogą zyskać przewagę konkurencyjną i lepsze wyniki finansowe poprzez inwestycje w zrównoważony transport i zarządzanie łańcuchem dostaw. Transport drewna okrągłego stanowi istotny element łańcucha dostaw w przemyśle drzewnym i papierniczym, który charakteryzuje się wysokim zużyciem zasobów i emisjami, co może negatywnie wpływać na środowisko. Na podstawie badań Govindan i in. (2020) oraz Dev i in. (2020) można domniemywać, że stosowanie zrównoważonych praktyk w transporcie drewna może przynieść szereg korzyści ekonomicznych i ekologicznych. Kompleksowa analiza logistyki dystrybucji biomasy drzewnej, uwzględniająca zarówno perspektywy biznesowe, ekologiczne, jak i społeczne jest szczególnie ważna w kontekście rozprawy, która ma na celu omówienie ekonomicznych i ekologicznych aspektów obrotu drewnem. Dlatego w opracowaniu wykorzystano wyniki badań (#2) które dostarczyły narzędzi i metodologii do oceny i optymalizacji logistyki dystrybucji biomasy drzewnej. Takie podejście może być bezpośrednio zastosowane do analizy efektywności ekonomicznej i ekologicznej transportu drewna. Wydaje się, że niezwykle ważne są badania pozwalające na poszukiwanie metod optymalizacji logistyki dystrybucji biomasy leśnej, uwzględniając redukcję emisji gazów cieplarnianych jako metrykę ekologiczną oraz koszty produkcji i nakłady kapitałowe jako metryki biznesowe. Takie podejście jest istotne dla zrozumienia, jak efektywne zarządzanie logistyką może przyczynić się do zrównoważonego rozwoju i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko, co jest kluczowe w badaniach nad ekologicznymi aspektami obrotu drewnem.

Współczesny rynek drewna okrągłego w Polsce jest kształtowany przez wiele czynników zarówno ekonomicznych, jak i ekologicznych. Z ekonomicznego punktu widzenia, kluczowymi elementami determinującymi funkcjonowanie rynku są nie tylko ilości dostępnego surowca, ale także jego cena. Cena drewna stanowi istotny element, który należy uwzględnić w analizach naukowych dotyczących obrotu surowcem drzewnym, ponieważ wpływa ona na optymalizację planowania sprzedaży i zarządzanie zasobami (Stanula i in. 2024). Co więcej, w obecnej rzeczywistości rynkowej ceny drewna nie są głównym czynnikiem regulującym dostępność surowca na rynku, ale pełnią kluczową rolę w kształtowaniu strategii rynkowych przedsiębiorstw drzewnych (Górna i in., 2022). Zmiany cen drewna są analizowane pod kątem szeregu czynników, takich jak polityka, warunki przyrodnicze i dynamika rynkowa, co wskazuje na złożoność mechanizmów kształtujących rynek drewna okrągłego. Zrozumienie tych mechanizmów jest kluczowe dla efektywnego zarządzania zasobami leśnymi oraz optymalizacji ekonomicznej działalności przedsiębiorstw leśnych i drzewnych. Wykorzystanie metod predykcji zmian cen produktów drzewnych, opartych na analizie szeregów czasowych, pozwala na lepsze prognozowanie przyszłych trendów rynkowych (Zwirglmaier 2010). Tego typu analizy są niezbędne nie tylko dla zapewnienia stabilności ekonomicznej sektora leśnego, ale także dla jego zrównoważonego rozwoju.

Istotnym jest to, że ekonomiczne aspekty obrotu drewnem okrągłym w Polsce można analizować przez pryzmat teorii cen, która stanowi fundamentalne narzędzie do badania alokacyjnych problemów w złożonych systemach gospodarczych. Jak wskazuje Weyl (2019) w swoim opracowaniu na temat teorii cen, kluczową rolę w zrozumieniu zachowań rynkowych odgrywa uproszczenie skomplikowanych zjawisk do kilku kluczowych zmiennych, takich jak ceny, które mogą wystarczająco opisać równowagi rynkowe i problemy optymalizacyjne w złożonych gospodarkach (Weyl 2014). W kontekście rynku drewna okrągłego i szerzej biomasy drzewnej, analiza cen jest nieodzowna, ponieważ pozwala na lepsze zrozumienie mechanizmów kształtujących podaż i popyt na ten surowiec oraz ich wpływ na rynek krajowy i międzynarodowy. Cena surowca drzewnego, jako kluczowy element rynku, wpływa zarówno na decyzje inwestycyjne jak i na alokację zasobów w sektorze leśno-drzewnym. Współczesne podejście do teorii cen, jakie proponuje Weyla (2019), kładzie nacisk na zrozumienie "prostych" modeli rynkowych, które mogą być zastosowane do badania specyficznych rynków takich jak rynek drewna okrągłego, gdzie decydującą rolę odgrywają zmienne takie jak elastyczność popytu czy zmienne endogeniczne, na przykład nierówności dochodowe.

Ekologiczne aspekty obrotu drewnem są równie istotne, ponieważ dotyczą zrównoważonego zarządzania zasobami leśnymi. Wzrost zapotrzebowania na drewno, wynikający z rosnącej konsumpcji i rozwoju przemysłu drzewnego, stawia nowe wyzwania przed gospodarką leśną, która musi balansować między maksymalizacją produkcji a ochroną środowiska. Zastosowanie teorii cen w kontekście ekologii może również pomóc w wyznaczeniu optymalnych strategii zrównoważonego zarządzania zasobami naturalnymi, które minimalizują negatywny wpływ na ekosystemy leśne, jednocześnie wspierając ich zdolności regeneracyjne.

Ponad to zgodnie z analizami Zhang i in. (2014), wyższe i bardziej zmienne ceny paliw kopalnych mają głęboki wpływ na rynki energii i produktów drzewnych na poziomie międzynarodowym. Wykorzystanie modelu równowagi częściowej w ich badaniach pokazało, że zwiększone wykorzystanie bioenergii drzewnej, w formach takich jak drewno opałowe, etanol celulozowy z biomasy drzewnej oraz energia elektryczna produkowana z drewna, może znacząco wpłynąć na globalne rynki produktów drzewnych oraz paliw ciekłych, stałych i gazowych (Zhang i in. 2014). Modele te wskazują na potencjalny wzrost popytu na etanol celulozowy w Stanach Zjednoczonych na przestrzeni następnych 30 lat, jeśli ceny ropy naftowej pozostaną wysokie. Zastosowanie takich modeli jest kluczowe do prognozowania przyszłych interakcji rynkowych oraz oceny wpływu alternatywnych polityk i zachęt rynkowych. Podkreśla to również znaczenie uwzględnienia cen energii drzewnej w analizach rynkowych, co jest istotne w kontekście rosnącego zapotrzebowania na biomasę drzewną i związanych z tym zmian na rynku drewna okrągłego.

Niniejsza rozprawa doktorska ma na celu szczegółową analizę ekonomicznych i ekologicznych aspektów obrotu drewnem okrągłym w Polsce, wykorzystując podejście oparte na teorii cen do zrozumienia dynamiki rynku oraz strategii zrównoważonego zarządzania zasobami leśnymi i przede wszystkim identyfikacji możliwości przewidywania tych zmian ekonomicznych.

Ekologiczne aspekty obrotu drewnem okrągłym są równie istotne, gdyż obejmują zarówno ochronę różnorodności biologicznej, jak i zarządzanie zasobami naturalnymi w sposób zrównoważony. Zwiększenie lesistości i promowanie naturalnej regeneracji lasów w Polsce są kluczowymi elementami polityki ekologicznej, mającymi na celu nie tylko ochronę środowiska, ale także zapewnienie stabilności ekosystemów leśnych w kontekście rosnącego zapotrzebowania na drewno (Kozuch i in. 2023). Wobec presji wynikającej z czynników politycznych, przyrodniczych i rynkowych, zrównoważone zarządzanie lasami staje się

wyzwaniem wymagającym uwzględnienia zarówno potrzeb ekonomicznych, jak i ekologicznych.

W zakresie zarządzania zasobami drzewnymi w Polsce, zgodnie z zarządzeniem Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych (Zarządzenie nr 97, 2023), obowiązują przepisy przejściowe dotyczące sprzedaży drewna Lasów Państwowych, obowiązują przejściowe zasady sprzedaży drewna [<http://www.zilp.lasy.gov.pl>]

Można wyróżnić następujące procedury sprzedaży drewna dla podmiotów gospodarczych:

- a) przetargi ograniczone za pośrednictwem Portalu Leśno-Drzewnego,
- b) systemowe aukcje internetowe za pośrednictwem aplikacji "e-drewno",
- c) aukcje internetowe za pośrednictwem aplikacji "e-drewno",
- d) inne aukcje i składanie ofert,
- e) negocjacji handlowych,
- f) cennik detaliczny."

Należy podkreślić, że obowiązujące regulacje w zakresie sprzedaży drewna przez Lasy Państwowe nie w pełni korespondują z obowiązującymi przepisami. Lasy Państwowe nie odpowiadają w pełni ani potrzebom efektywnej polityki leśnej, ani oczekiwaniom polskiego przemysłu drzewnego. Brak stabilnej polityki gospodarczej w sektorze leśnym, skutkujący niekontrolowanym zderzeniem interwencyjnych regulacji z mechanizmami rynkowymi, nie sprzyja rozwojowi polskiego leśnictwa i wzrostu jego konkurencyjności. To ma jednak bezpośredni wpływ na wzrost cen drewna, który obserwujemy w ostatnich latach.

Największy potencjał w branży drzewnej ma przemysł tartaczny. Celem przedsiębiorstw tartacznych jest poprawa rentowności przy stabilnym wykorzystaniu zasobów surowcowych. Działania zakładów przerobu drewna opierają się na dokonywaniu oceny cenowej dostosowanej do popytu, także w obszarze zapewnienia biomasy energetycznej, która wpływa na cele społeczne, co potwierdza aspekt ekonomiczny jak i również środowiskowo-społeczny (Stanula i in. 2023). Trociny i zrębki, które powstają jako pozostałość procesu produkcyjnego, mogą być wykorzystane zarówno w procesach produkcyjnych, jak i w innych procesach (np. przetwarzane na tworzywa drzewne, bezpośrednio spalane, lub przetwarzane na inne paliwa

stałe i płynne). Rodzaj biomasy jak i jej parametry fizyko-chemiczne zawarte są w ramowych wymaganiach jakościowych danej grupy energetycznej lub bezpośrednio ograniczeniach zastosowania biomasy. Powstały produkt znajduje zastosowanie jako materiał energetyczny oraz produkt stosowany w produkcji materiałów płytowych (Walkiewicz i in. 2022).

Wprowadzenie zwiększonego wykorzystania produktów ubocznych przyczynia się do ograniczenia zużycia drewna jak i paliw kopalnych (2030 climate & energy framework). Stąd celowość podjęcia tematu znaczenia obiegu zamkniętego i ekologii w obszarze obrotu drewnem, szczególnie wśród wąskiej liczby danych literaturowych i badań naukowych na temat czynników ekonomicznych kształtujących potencjał przetworzenia biomasy drzewnej przemysłowej. Większość badań związanych jest z wykorzystaniem biomasy leśnej oraz weryfikacji prognozowania zmian cenowych biomasy leśnej (Górna i in. 2023, Kożuch i in. 2022). Aby skutecznie ocenić zrównoważony charakter przerobu biomasy, należy przeprowadzić analizę przetworzenia i logistyki w obszarze struktury surowcowej i kalkulacji ekonomicznej technologii poprodukcyjnej.

Do analizy potencjału ekonomicznego, wybrano obszar Polski i dane dotyczące zmienności cenowej biomasy oferowanej przez tartaki, które stanowią pierwsze ogniwo przerobu drewna okrągłego. W pracy dokonano klasyfikacji zmienności cenowej z punktu widzenia produktów ubocznych stanowiących wynik przerobu surowca drzewnego.

Intensyfikacja produkcji leśnej i drzewnej wpływa na wzrost zrównoważonego rozwoju i zastąpienia materiałów kopalnych (He i in. 2018, Zhai i in. 2021). Możliwe jest wytwarzanie cennych produktów z biomasy drzewnej, a produkty uboczne w wielu przypadkach są kierowane do spalania (Suttles i in. 2014, Buchholz i in. 2021). Zasoby leśne są rozproszone, co zwiększa koszty zbiórki, obsługi i transportu. Ponadto, istnieje zmienność w jakości biomasy drzewnej ze względu na dostępność zasobów leśnych, warunki pogodowe, wstępne przetwarzanie, transport i przechowywanie oraz konkurencję ze strony innych odbiorców końcowych (Tomczak i in. 2023; Paluš i in. 2020). Skutkuje to stosunkowo kosztowną i złożoną logistyką pozyskiwania, transportu i wykorzystania biomasy drzewnej. Koszty logistyki biomasy stanowią 10-30% kosztów dostarczonego drewna (Stanula i in. 2023) i ograniczają konkurencyjność biomasy drzewnej. Efektywny kosztowo projekt łańcucha dostaw biomasy drzewnej ma kluczowe znaczenie dla zrównoważonego rozwoju.

W procesie zarządzania zasobami biomasy drzewnej dąży się do wzrostu znaczenia redukcji negatywnego oddziaływania na środowisko. Wpływa to na coraz większe znaczenie

zasad zrównoważonego rozwoju w procesie zagospodarowania produktów drzewnych [<https://climate.ec.europa.eu/>]. Coraz większa świadomość negatywnych konsekwencji wykorzystania surowców kopalnych na rzecz surowców odnawialnych (Dain i Ozarska 2009) zwiększa udział decyzji i działań podejmowanych przez producentów i konsumentów uwzględnienia środowiskowych kierunków decyzyjnych oraz ekologicznej polityki zagospodarowania biomasy drzewnej. Efektem jest maksymalizacja wykorzystania surowców produkcyjnym oraz przejście do obiegu zamkniętego „zero waste” (Gonzales i in. 2019). Zwiększenie wykorzystania surowców odnawialnych jest kierunkiem działania przedsiębiorstw związanych z przerobem drzewnym (Bell i in. 2013). Branża drzewna jest przykładem racjonalnego zagospodarowania surowca drzewnego. W praktyce oznacza to wytworzenie produktów drzewnych, o zdolności do ponownego wykorzystania, recyklingu (Encyklopedia leśna). Takie możliwości i działania przekładają się bezpośrednio na korzyści ekonomiczne i środowiskowe wpływając na kształtowanie neutralnego środowiska obiegu biomasy drzewnej (Neykov i in. 2020).

W analizowanych badaniach dokonano oceny łańcuchów dostaw biomasy drzewnej (Berrette i in. 2018). Zarządzanie łańcuchami dostaw (Eliasson i in. 2016) prowadzone jest z naciskiem na poziom decyzji strategicznej, taktycznej i operacyjnej (Stanula i in. 2023). W dotychczasowych badaniach optymalizacji łańcuchów dostaw biomasy koncentrowało się jedynie na ekonomicznym aspekcie łańcuchów dostaw biomasy leśnej w postaci drewna i pozostałości leśnych. Odniesienie do aspektów społecznych i środowiskowych uwzględniały tylko niektóre czynniki, brane pod uwagę przy projektowaniu łańcuchów dostaw biomasy (Leśkiewicz 2018, Wiederkehr i in. 2024). Zintegrowano czynniki ekonomiczne, środowiskowe i społeczne w ocenie i optymalizacji łańcuchów dostaw biomasy drzewnej.

Transport drewna to jeden z pierwszych elementów zarządzania logistycznego, od którego w znacznym stopniu zależy efektywność gospodarowania w sektorze leśno - drzewnym. Ze względu na obowiązujące akty prawne dotyczące polityki transportu oraz przepisy kodeksu drogowego, konieczne jest osiągnięcie optimum pomiędzy ochroną środowiska a ekonomicznymi aspektami transportu. Zakres zrównoważonej gospodarki w pozyskaniu i transporcie surowca drzewnego jest prezentowany w dokumentach unijnych, m.in. w "Zielonej księdze w sprawie ochrony lasów i informacji w UE: przygotowanie lasów na zmianę klimatu" oraz rezolucji Parlamentu Europejskiego z 28 kwietnia, 2015 r. w sprawie "Nowej strategii leśnej UE: na rzecz lasów i sektora związanego z leśnictwem" (2014/2223(INI))

(<https://ec.europa.eu/environment/forests/gp.html>;

[http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126\\_PL.html](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126_PL.html)).

Transport drewna wymusza podejmowanie działań mających na celu użytkowanie lasów w sposób zapewniający zachowanie struktury biologicznej oraz pełnienie gospodarczych funkcji lasów bez szkody dla innych ekosystemów (Buchholz i in. 2021). Takie podejście wymaga zarówno przygotowania jak i dostosowania w celu zapewnienia efektywnego systemu transportowego, ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko (Conrad 2018). Kwestie transportu związane z gospodarką drzewną są istotne nie tylko z punktu widzenia sprawnych i ekonomicznie uzasadnionych dostaw surowca drzewnego, ale także z jego wpływu na środowisko. W grupie dostaw surowca o wyższych wskaźnikach wartości, dominujący jest transport drogowy. Wynika to ze specyfiki przewożonych sortymentów drzewnych, zwłaszcza jeśli chodzi o drewno okrągłe (Leśkiewicz 2018). W Polsce wytyczne dotyczące transportu i bezpieczeństwa drewna zawarte są w Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 25 stycznia 2018 r., które opisuje zarówno właściwe rozmieszczenie przewożonego surowca, jak i związane z tym środki bezpieczeństwa transportu.

Ważnym elementem planowania transportu drogowego drewna jest maksymalna dopuszczalna na drogach masa całkowita środków transportowych (DMC). W Polsce ograniczenia te określa Art. 61 § 15 ustawy Prawo o ruchu drogowym, wskazujący na poziom 40-42 Mg w zależności od postaci zespołu pojazdów (polskie przepisy krajowe (Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. o ruchu drogowym)).

W krajach europejskich występuje duża zmienność w zakresie obowiązujących ograniczeń przy załadunku pojazdów, która wynika ze zróżnicowanej dopuszczalnej masy całkowitej (Kozakiewicz i Krzosek 2013). Duże zróżnicowanie w poziomach maksymalnej dopuszczalnej masy ładunkowej oraz różnic w masie całkowitej zespołu pojazdów drogowych powodują, że przekraczanie dopuszczalnej masy zastawów wiąże się ze zwiększonym zużyciem paliwa i emisją spalin. Stąd potrzeba analizy zagadnień związanych z optymalizacją transportu drewna. Zarówno zmienność przepisów, jak i różnorodność przygotowania zestawów ładunkowych drewna wymagają opracowania propozycji dotyczących możliwości zwiększenia objętości ładunkowej i dostosowania jej do ładowności pojazdów.

Kolejnym zagadnieniem jest efektywność racjonalnego przerobu drewna na materiały i wyroby, która zależy od kompleksowych czynników produkcyjnych, technologicznych i rynkowych. W warunkach rynkowych krajów Unii Europejskiej występują dla wyrobów

tartacznych istotne różnice wynikające z wielkości przerobu drewna dla zakładów drzewnych, a także metod produkcji wynikające z wydajności urządzeń technologicznych. Dynamiczny rozwój tartaków jest wynikiem sytuacji rynkowej w latach 2019-2022 oraz polityki sprzedaży drewna przez Lasy Państwowe. Zmiany polityki rynkowej doprowadziły do znacznego przesunięcia kosztocłonności produkcji. Jak wskazują dane Głównego Urzędu Statystycznego (2023) według Polskiej Klasyfikacji Działalności (PKD), produkcja drewna i wyrobów z drewna, w tym: wyroby tartaczne, płyty, sklejki, okleiny, wyroby stolarskie, meblowe, wyroby z korka i wikliny - z wyłączeniem mebli) stabilizowała się na poziomie 37-42 mln m<sup>3</sup>. Według prowadzonej analizy (Jabłoński 2000), oraz biorąc pod uwagę ilość kupowanego w Lasach Państwowych surowca, w polskim przemyśle tartacznym dominującą rolę przejmują zakłady o wydajności 50 - 400 tys. m<sup>3</sup>/rok. Grupa małych (do 5 tys. m<sup>3</sup> /rok) i średnich (od 5 do 50 tys. m<sup>3</sup> /rok) przedsiębiorstw stanowiąca dominujący udział liczebności polskich zakładów produkujących wyroby z drewna prezentujących największą dynamikę rozwoju (Mydlarz i Wieruszewski 2022). Koncentracja potencjału pracowniczego i jego specjalizacja wynika z ograniczenia kosztocłonności procesów produkcyjnych. Przykładem są niemieckie, austriackie i szwedzkie tartaki zorientowane na produkcję tarcicy wielkowymiarowej głównie na potrzeby budownictwa (Krzosek 2003, Lis i in. 2000).

Zarządzanie zasobami leśnymi w Polsce musi uwzględniać zarówno potrzeby gospodarcze, jak i ekologiczne, aby sprostać wyzwaniom związanym z ochroną lasów i zwiększeniem ich produktywności w sposób zrównoważony (Rotowa i in. 2023). Dlatego koniecznym jest wspieranie zachodzących zmian w zakresie polityki leśnej holistycznymi badaniami obejmującymi zarówno aspekty ekonomiczne jak i ekologiczne aspekty obrotu drewnem okrągłym. Niniejsza rozprawa doktorska ma na celu szczegółowe zbadanie ekonomicznych i ekologicznych aspektów obrotu drewnem okrągłym w Polsce, z uwzględnieniem złożonych zależności między czynnikami rynkowymi, cenowymi oraz strategii zrównoważonego rozwoju. Przeanalizowane zostaną również metody predykcji zmian cen drewna oraz ich rola w kształtowaniu polityki gospodarczej i ekologicznej sektora leśnego.

Rozważenie problemów powiązania ekonomicznych, środowiskowych i społecznych decyzji dotyczących łańcucha dostaw jest konieczne, aby zapewnić zrównoważone wykorzystanie biomasy leśnej do produkcji bioenergii i wyrobów drzewnych. Przeprowadzone badania miały na celu ocenę i optymalizację projektowania i zarządzania łańcuchami dostaw biomasy leśnej zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju. Badania oceny techniczno-ekonomicznej okazały się przydatne, aby zapewnić wgląd w wykonalność wykorzystania biomasy w różnych warunkach rynkowych. Były one przydatne do oceny ekonomicznej wykonalności różnych projektów związanych z biomasą drzewną oraz pozwoliły porównać wyniki ekonomiczne niewielkiej liczby alternatywnych łańcuchów dostaw tej biomasy. Nie mogą one jednak w pełni zapewnić optymalnego projektu łańcucha dostaw. Dla pełnej oceny środowiskowej wykorzystania biomasy, należy uwzględnić wpływ na zdrowie ekosystemów leśnych (gleba, wodę i bioróżnorodność) jednak wskaźniki i metody są nadal słabo rozwinięte.

Badania uwzględniające wpływ łańcucha dostaw biomasy na zrównoważony rozwój nie są w stanie w pełni przeanalizować potencjalnych kompromisów między poszczególnymi czynnikami. Badania optymalizacyjne są ważne w określaniu optymalnego projektu łańcuchów dostaw biomasy leśnej, gdy istnieje wiele alternatyw na różnych etapach i poziomach planowania (Akhtari i in. 2013). Optymalizacja będzie wymagać najefektywniejszych narzędzi oceny wykorzystania dostępnych zasobów w praktycznych rozwiązaniach (Ghaffariyan i in. 2013) uwzględniających aspekty środowiskowe i społeczne, aby zapewnić zrównoważony rozwój nowych projektów wykorzystania biomasy drzewnej.

Badania dotyczące modelowania środowiskowych i ekonomicznych łańcuchów dostaw biomasy leśnej poprzez połączenie LCA i optymalizacji wielopodmiotowej jest skuteczne w integrowaniu różnych kryteriów zrównoważonego rozwoju w projektowaniu łańcuchów dostaw biomasy leśnej. Mogą one dostarczyć wiarygodnych informacji na temat kompromisów w zakresie zrównoważonego rozwoju pod warunkiem spójności w jednostkach i zakresach oczekiwanych celów. Główne czynniki przemawiające za wytwarzaniem produktów z biomasy leśnej są związane z ich potencjałem do generowania korzyści ekonomicznych oraz pomagają osiągnąć niezależność energetyczną. Potrzebne są dalsze badania, aby określić istotne skutki systemów wykorzystania biomasy drzewnej. Istnieje również potrzeba opracowania systemów wspomaganie decyzji, które uwzględniają kwestie środowiskowe takie jak wpływ na bilans węgla biomasy leśnej, bioróżnorodność biologiczną,

odporność lasów i kwestie społeczne, takie jak dobrobyt społeczności w projektowaniu i planowaniu łańcucha dostaw biomasy leśnej.

W zakresie powiązań ekonomicznych zrównoważonego rozwoju gospodarki drzewnej na wskaźnik przerobu drewna wpływają wahania cen wynikające z uwarunkowań rynkowych, przyrodniczych i organizacyjnych (Kolo i Tzanova 2022). Są one jednym z głównych źródeł niepewności w planowaniu ekonomicznym (Buongiorno 2015). Stąd też stabilność oraz przewidywalność rynku stanowi zachętę dla inwestorów w odniesieniu do decyzji inwestycyjnych służących rozwojowi danej branży (Chai i in. 2019). Predykcja cen stanowi jeden z podstawowych instrumentów wsparcia procesów decyzyjnych w gospodarce. Dlatego wiedza dotycząca cen rynkowych, w tym przypadku ceny biomasy leśnej, wydaje się być korzystna zarówno dla dostawców, jak i odbiorców surowca drzewnego (Kožuch i Ankudo–Jankowska 2021, Góran i in. 2023).

Obserwowane zmiany technologiczne i dostosowanie przepisów oraz rosnąca optymalizacja wykorzystania drewna są głównymi czynnikami wpływającymi na wahania handlu produktami drzewnymi (GUS 2023). W większości przypadków zmiana cen produktów ubocznych przerobu drewna jest spowodowana wzrostem zapotrzebowania na produkty drzewne, celulozę jak i biomasowe materiały energetyczne. W przyszłości sektor wykorzystania biomasy przemysłowej może nabrać znaczenia ze względu na zainteresowanie i zużycie odnawialnych źródeł biomasy.

W analizach prognostycznych zmian cenowych konieczne jest skoncentrowanie się na nowych sektorach działalności przemysłu drzewnego (produkcja papieru, handel tarcicą, biomasa jako odnawialne źródło energii). Przemysł drzewny (Mehrotra i in. 2014) funkcjonuje w oparciu o czynniki rynkowe, które kształtują podaż i popyt na pierwotnym rynku drewna. Zmiany preferencji rynku determinują długoterminowe trendy w sektorze produktów przemysłowych. Cykliczność wzorców cenowych na biomasę przemysłową związana jest z kondycją gospodarki europejskiej odpowiedzialną za ogólne fluktuacje cen drewna. Sytuacja na europejskim rynku drzewnym była również związana z fazami światowego cyklu gospodarczego. Fluktuacje w cenach zbiegły się ze szczytem koniunktury w polskiej gospodarce drzewnej ze względu na rosnący popyt ze strony sektora budowlanego. Jednak w Polsce popyt na sortymenty uboczne przerobu drewna został szczególnie zdominowany brakami paliw stałych. W tej sytuacji szczególnie istotnego znaczenia nabierają badania

weryfikujące możliwości zastosowania różnych metod pozwalających na identyfikację przyszłych zmian rynkowych w tym dotyczących ceny.

Stwierdzone odchylenia w równowadze ekonomicznej obiegu surowca drzewnego, mogą ulegać wahaniom w ramach działalności przedsiębiorstw branży drzewnej w kolejnych latach, co jest wynikiem między innymi gwałtownych zmian cen biomasy energetycznej. Jest to także wynik zmian cen surowca drzewnego w obrocie pomiędzy rynkiem polskim i zachodnio europejskim z jednej strony, a rynkiem krajów bałtyckich i skandynawskich z drugiej (Lachowicz i Wysocka-Fijorek 2016). Zaostrzenie kryzysu energetycznego na terenie Europy Środkowej spowodowało wzrost inwestycji z wykorzystaniem Odnawialnych Źródeł Energii (OZE). Działania mające na celu zapewnienie dostępu do energii cieplnej jak i również elektrycznej przyniosły wahania (wzrost) cen na sortymenty, które można wykorzystać w celu wytworzenia energii cieplnej (biomasa leśna oraz drzewne produkty uboczne przerobów mechanicznych) odciążając tym samym wykorzystanie paliw kopalnych. Popularyzacja wykorzystania niskiej jakości biomasy sprzyja założeniom Nowego Zielonego Ładu (European Green Deal 2021), który definiuje wykorzystanie biomasy drzewnej z ograniczeniem pozyskania biomasy leśnej. Zmiany w poziomie ceny biomasy drzewnej odgrywają ogromną rolę w planowaniu kosztów jej zakupu. Jest to szczególnie ważne zważywszy na sytuację po wschodniej stronie Polski. Jednymi z największych dostawców pozostałości drzewnych były kraje wschodniej Europy t.j. Ukraina, Rosja, Białoruś (Vlad i Toma 2022). Umniejszone zasoby przez wstrzymanie importu z krajów wschodnich jest jedną z przyczyn wzrostu cen surowców drzewnych przeznaczonych na cele biomasy.

Element łańcucha dostaw surowca iglastego do zakładów drzewnych w Polsce określa strukturę związaną z okresowym zapotrzebowaniem tych podmiotów na drewno. Struktura ta jest konsekwencją zmian w intensywności produkcji, które charakteryzują okresowość zapotrzebowania rynku na produkty drzewne. Jednocześnie skala dostaw wynika z racjonalności pozyskania i przygotowania drewna do odbioru na pojazdach kołowych. Zwiększone dostawy w obszarze blisko zlokalizowanym od zakładów drzewnych odzwierciedlają uzasadnioną tendencję do ograniczania przemieszczania drewna wielkowymiarowego. W odniesieniu do różnic występujących pomiędzy krajami Unii Europejskiej, ważnym aspektem jest dyskusja na temat maksymalnego obciążenia w transporcie drogowym oraz jego dostosowania do rzeczywistej DMC pojazdów transportowych. W odniesieniu do zapotrzebowania zakładów drzewnych na surowiec, zaobserwowano strukturę dostaw drogowych zdeterminowaną na dominujący udział dostaw

z obszaru do 90 km, co stanowi około 62%. Rzeczywiste wyniki uzyskane w niniejszym opracowaniu wskazują na mniejsze niż dopuszczalne wykorzystanie DMC pojazdów transportujących drewno sosnowe. Natomiast z punktu widzenia aspektów ekonomicznych jak i środowiskowych, celem jest całkowite wykorzystanie maksymalnej dopuszczalnej masy całkowitej pojazdów transportujących drewno okrągłe, co może wpłynąć na mniejszą liczbę przejazdów o niższym sumarycznym koszcie środowiskowym.

Należy jednak podkreślić, że mimo znacznych korzyści wynikających z wykorzystania DMC pojazdów, rozwiązanie to nie zawsze jest stosowane w praktyce, m.in. ze względu na dostępność przygotowanego surowca na powierzchniach odbiorczych nadleśnictw. Mimo to, działania podejmowane w celu optymalizacji wypełnienia środków transportu kołowego sugerują, że zmniejszenie zużycia paliw jest realnym celem dla sektora transportu towarów (Delgado i in. 2017). Zmiany w zakresie DMC mogą mieć jednak ograniczenia wywołane rozporządzeniem Komisji (UE) 2019/318 z dnia 19 lutego 2019 r. (Rozporządzenie UE 2019) zmieniającym rozporządzenie (UE) 2017/2400 (Rozporządzenie UE 2017) i dyrektywę 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady (Dyrektywa 2007) do poziomów emisji CO<sub>2</sub> o 15% do 2025 r. i o 30% do 2030 roku. Rozporządzenie zakłada stopniowe zmniejszenia zużycia paliwa przez pojazdy ciężarowe. Jako poziom odniesienia przyjęto emisję spalin na przełomie 2019/ 2020 r. (Comisjon Regulation 2019).

Zmianie maksymalnego dopuszczalnego obciążenia w transporcie drogowym powinno towarzyszyć zweryfikowanie rzeczywistej masy zespołu pojazdów i objętości wykorzystywanych rodzajów surowca drzewnego. W konsekwencji możliwe będzie ograniczenie zarówno liczby ładunków poprzez osiągniętą DMC maksymalną dopuszczalną masę, jak i ograniczenie zasięgu transportu kołowego. Pozytywnie na redukcję kosztów transportu surowca drzewnego może również wpływać zwiększona maksymalna dopuszczalna masa całkowita zespołu pojazdów, jak to ma miejsce w innych krajach europejskich. Wszystkie te działania optymalizujące przyczyniają się do zmniejszenia śladu węglowego na różnych etapach łańcucha dostaw. Mogą także wspierać zrównoważony rozwój łańcucha dostaw i politykę zrównoważonego rozwoju uczestniczących w nim przedsiębiorstw.

W sektorze transportowym zrównoważony rozwój opiera się na analizie jego wpływu na środowisko, poprzez zużycie przez sektor paliw kopalnych i emisję CO<sub>2</sub>. Według danych ICCT (International Council on Clean Transportation) średnie zużycie paliwa przez samochody ciężarowe w latach 2000-2015 kształtowało się na poziomie ok. 36 l/100 km. To

wskazuje, że w ostatnich latach podjęto wysiłek, aby zredukować zużycie paliw do poziomu średniego 29 l/100 km, który to poziom został szczególnie uwzględniony w niniejszym opracowaniu.

Kierunek wykorzystania drewna w zrównoważonym łańcuchu zależy od szeregu mniej lub bardziej istotnych czynników. Decydującym jest opłacalność przerobu drewna dająca się ilościowo określić i analizować. Można oczekiwać, iż z biegiem czasu rynek drewna będzie podążał do najbardziej efektywnej struktury jego zagospodarowania poprzez relacje popytu poszczególnych branż przemysłu drzewnego wyznaczanego przez tę opłacalność. Poziomy zapotrzebowania odbiorców wywierają wpływ na wysokości cen poszczególnych sortymentów drewna. Podążają one do indywidualnie kształtowanej wartości drewna akceptowanych przez poszczególnych przedsiębiorców zakładających oczekiwane poziomy operacyjnej rentowności przerobu. Istotny jest też wpływ aktualnej sytuacji rynkowej w danej fazie cyklu koniunktury gospodarczej, jak również poziomu techniczno – organizacyjnego danego zakładu drzewnego i działalność jego służb zbytu i zaopatrzenia (Stanula i in. 2023). Najważniejszym z oczekiwań przedsiębiorców jest poziom rentowności operacyjnej w jego warunkach technicznych i rynkowych. Koszty dowozu surowca ze składnic leśnych do zakładu ważą istotnie, szczególnie w ostatnim okresie, na koszty produkcji (Stanula i in. 2023b). Przy relatywnie wysokim ich poziomie, wartość drewna w jego przypadku może być niższa zgodnie z obliczeniami wg proponowanej formuły. Zauważalne są również wartości odzysku ze sprzedaży lub przerobu na miejscu zrębków i trocin (Hruzik 2005). Wartość obliczeniowa drewna w istotny sposób określa optimum zagospodarowania surowca.

## 8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Biomasa leśna i drzewna stanowi potencjał w zakresie redukcji materiałów generujących koszty środowiskowe. Optymalizacja decyzji cyklu życia produktu musi uwzględniać przy planowaniu łańcucha dostaw biomasy leśnej i produktów drzewnych integrację oceny czynników zrównoważonego rozwoju pozwalających zapewnić korzyści dla społeczeństwa.

Zastosowane ekonomiczne, społeczne i środowiskowe łańcuchy dostaw biomasy drzewnej i elementy produkcji drzewnej uwzględniają elementy oceny i optymalizacji procesu decyzyjnego dla zastosowania w łańcuchach dostaw.

Optymalizacja ekonomiczna jest szeroko wykorzystywana jako pomoc w projektowaniu łańcuchów dostaw biomasy leśnej. Istniejące narzędzia obliczeniowe, wspomagające w procesie podejmowania decyzji, które określają ilościowo i optymalizują ekonomiczne, środowiskowe i społeczne aspekty łańcucha dostaw biomasy leśnej, mogą obejmować wykorzystanie parametrów takich jak ocena cyklu życia, ilościowe określenie wpływu na zrównoważony rozwój w obszarze leśnictwa i drzewnictwa.

W badanym horyzoncie czasowym stwierdzono okresowo występujące odchylenia poziomów cenowych biomasy. Gwałtowne spadki powodowane często przez czynniki rynkowe, w tak szerokich przedziałach mogą być trudne do zidentyfikowania. Nieregularne wahania prognozowanych zmian cenowych dla produktów ubocznych przerobu drewna stanowiły niepewną część analizowanych danych. Charakter występowania silnych zaburzeń rynkowych (w tym politycznych) wpłynął znacznie na cenę sortymentów drewna okrągłego.

Wahania sezonowe cen produktów ubocznych występujące w horyzoncie rocznym związane są z sezonowością pozyskiwania popytu na drewno okrągłe. Sezonowością charakteryzowały się sortymenty takie jak zrębka i trociny, gdzie zanotowano wzrost ceny w IV kwartale ostatniego roku (2022).

W długim okresie rosnący popyt na drewno okrągłe powodować będzie stopniowy wzrost cen, co jednak nie jest zgodne z wskazaniem dokonany na modelowanym przykładzie. Dalsze badania wymagają wprowadzenia nowych modeli dla określenia wpływu zmian na predykcję cen produktów ubocznych przerobu drewna zarówno w Polsce jak i innych krajach Europy.

Badanie łańcucha dostaw surowca drzewnego wykazało, że w przypadku odbiorców surowca iglastego maksymalna odległość transportu wynosiła ponad 500 km, a dominujący

jest dystans do 90 km (dla 62% odbiorców). Odległość, na którą transportowany jest surowiec zależy zarówno od lokalizacji zasobów drzewostanów, jak i popytu na wybrane sortymenty surowca. Racjonalna jest tendencja optymalnego wypełnienia środków transportu powiązana z dostosowaniem odbiorów do minimalnej objętości załadowniczej w granicach DMC. Pozwala ona na redukcję ilości kursów od 7% do 16%. Ponadto należy wziąć pod uwagę możliwości załadunkowe zespołów pojazdów załadowniczych w zakresie ich bezpieczeństwa przemieszczania oraz DMC zespołu pojazdów. Optymalizacja procesów logistycznych w zakresie dostaw jest odzwierciedleniem optymalizacji ekonomicznej.

Koszty ekonomiczne zużycia paliw i środowiskowe związane z emisją CO<sub>2</sub> w procesie transportu są identyfikowane jako redukcja niewykorzystania pojazdów w procesie dostaw (zweryfikowane poprzez badania). Ekonomiczny wskaźnik wykorzystania ładowności pojazdów, przekłada się na redukcję kosztu zużycia paliwa dzięki ograniczeniu liczby przejazdów. Efekt środowiskowy jest ważny w aspekcie redukcji zużycia oleju napędowego. Przy założonym transporcie ok. 1 mln m<sup>3</sup> surowca sosnowego, roczne oszczędności mogą osiągać od 7% do 20% poniesionych nakładów finansowych na zakup paliwa kopalnego (ON).

Trudności w zakresie całkowitego wykorzystania powierzchni ładunkowej pojazdów transportowych można zredukować poprzez poprawę organizacji procesu przygotowania do transportu surowca drzewnego, co ma miejsce na placach odbiorczych poszczególnych nadleśnictw.

W zakresie wpływu technologii przerobu drewna, struktura i wielkość tartaków na obecnym etapie w Polsce w niewielkim stopniu wpływają na efektywność produkcji tarcicy i wyrobów z drewna.

Procesy technologiczne są bezpośrednio związane z asortymentem produkcji. Efektywność produkcji zależy w decydującym stopniu od relacji cenowych pomiędzy surowcem drzewnym a produktami tak na rynku lokalnym, jak i na rynku europejskim.

Efektywność produkcji wyselekcjonowanych elementów i wyrobów gotowych sosnowych typu paletowego kształtuje się w ostatnim roku 2023 na poziomie  $E_{pc}=135-161\%$  dzięki wartości dodanej produktów ubocznych. Rachunek wartości drewna z punktu widzenia opłacalności przerobu może znaleźć zastosowanie w pracach nad określeniem kierunku zmian struktury zapotrzebowania na drewno okrągłe.

Kryterium wartości dodanej w przerobie, jak również relacji efektywności może być wykorzystane w badaniach struktury zagospodarowania ograniczonej podaży drewna np.: w przedsiębiorstwach wielozakładowych.

Dostawy surowca drzewnego gorszej jakości skutkują znacznie niższą wydajnością materiałową i znacznie wyższymi kosztami produkcji w przemyśle drzewnym. Obecne zasady sprzedaży surowca drzewnego praktycznie uniemożliwiają firmie zakup surowca drzewnego bez solidnego zaplecza finansowego. Obowiązujące w Polsce zasady sprzedaży drewna nie gwarantują stabilnych dostaw surowca drzewnego i są niezrozumiałe dla wielu nabywców i w efekcie skutecznie hamują rozwój już istniejących firm.

Częściowym rozwiązaniem problemów surowcowych, byłoby wprowadzenie możliwości zawierania długoterminowych umów na dostawy surowca drzewnego z monopolistą rynkowym - Państwowym Gospodarstwem Leśnym Lasy Państwowe. Umowy takie powinny gwarantować stabilne dostawy surowca adekwatne do bieżących potrzeb branży, a jednocześnie skutkować przewidywalnością cen drewna w okresie obowiązywania umowy (w odniesieniu np. do kursów kluczowych walut lub innych wskaźników makroekonomicznych).

Reasumując, poniżej syntetycznie omówiono przyjęte do realizacji hipotezy badawcze, ze wskazaniem właściwych wniosków wynikających z przeprowadzonego procesu badawczego:

Hipoteza 1: Biomasa leśna i produkty drzewne stanowią potencjał w zakresie redukcji materiałów generujących koszty środowiskowe.

Wyniki: Wyniki wskazują, że biomasa leśna i produkty drzewne rzeczywiście mają potencjał w redukcji kosztów środowiskowych. Wprowadzenie optymalizacji decyzji cyklu życia produktu, uwzględniającej integrację oceny czynników zrównoważonego rozwoju, może przynieść korzyści społeczne i środowiskowe. Narzędzia takie jak ocena cyklu życia pozwalają na ilościowe określenie wpływu na zrównoważony rozwój.

**Wniosek: Hipoteza 1 została potwierdzona. Biomasa leśna może efektywnie zastępować inne materiały generujące wyższe koszty środowiskowe.**

Hipoteza 2: Optymalizacja decyzji związanych z cyklem życia produktów drzewnych prowadzi do zwiększenia korzyści społecznych i środowiskowych przy zachowaniu efektywności ekonomicznej.

Wyniki: Wyniki wskazują, że optymalizacja cyklu życia produktów rzeczywiście uwzględnia takie elementy jak łańcuchy dostaw biomasy drzewnej, ocena procesu decyzyjnego oraz optymalizacja ekonomiczna. Optymalizacja ta jest kluczowa w zakresie redukcji emisji CO<sub>2</sub> oraz ograniczenia kosztów paliwowych, co przyczynia się do korzyści społecznych.

**Wniosek: Hipoteza 2 została potwierdzona. Optymalizacja łańcuchów dostaw pozwala na uzyskanie zrównoważonych korzyści społecznych i środowiskowych.**

Hipoteza 3: Wahania sezonowe i rynkowe w cenach biomasy i produktów ubocznych mają istotny wpływ na planowanie łańcuchów dostaw oraz prognozowanie cen.

Wyniki: Wyniki wskazują, że w badanym okresie występowały odchylenia cen biomasy oraz produktów ubocznych przerobu drewna. Gwałtowne spadki cen wynikające z czynników rynkowych oraz wahania sezonowe miały wpływ na prognozowanie cen, co potwierdzają zmiany cen zrębek i trocin w IV kwartale 2022 roku.

**Wniosek: Hipoteza 3 została potwierdzona. Wahania rynkowe i sezonowe mają znaczący wpływ na ceny produktów biomasy i efektywność planowania łańcuchów dostaw.**

Hipoteza 4: Optymalizacja logistyczna w zakresie maksymalnego wykorzystania pojazdów transportowych w łańcuchach dostaw biomasy prowadzi do znacznej redukcji emisji CO<sub>2</sub> oraz kosztów paliwowych.

Wyniki: Wyniki badań wykazały, że poprawa organizacji transportu surowca, w tym optymalizacja załadunku pojazdów, pozwala na redukcję kursów transportowych od 7% do 16%. Ponadto, oszczędności w zużyciu paliwa mogą osiągnąć od 7% do 20%, co przekłada się na redukcję emisji CO<sub>2</sub>.

**Wniosek: Hipoteza 4 została potwierdzona. Optymalizacja logistyczna skutkuje redukcją emisji i kosztów paliwowych.**

Hipoteza 5: Efektywność produkcji wyrobów z drewna jest uzależniona od relacji cenowej między surowcem drzewnym a produktami gotowymi na rynku lokalnym i europejskim.

Wyniki: Wyniki wskazują, że efektywność produkcji wyrobów z drewna, zwłaszcza w przypadku wyrobów sosnowych, jest silnie związana z relacją cenową pomiędzy surowcem a produktami. Efektywność produkcji paletowych wyrobów sosnowych w 2023 roku wynosiła od 135% do 161%, co wynikało z wartości dodanej produktów ubocznych.

**Wniosek: Hipoteza 5 została potwierdzona. Efektywność produkcji jest zależna od relacji cenowych na rynku.**

Hipoteza 6: Zawieranie długoterminowych umów na dostawy surowca drzewnego z monopolistą rynkowym (Lasy Państwowe) stabilizuje ceny i zapewnia stabilność dostaw, co sprzyja rozwojowi przedsiębiorstw.

Wyniki: Wyniki wskazują, że obecne zasady sprzedaży surowca drzewnego są postrzegane jako nieefektywne i hamują rozwój firm. Wprowadzenie długoterminowych umów mogłoby zapewnić stabilne dostawy i przewidywalność cen, co mogłoby rozwiązać część problemów związanych z niepewnością rynku.

**Wniosek: Hipoteza 6 została częściowo potwierdzona. Długoterminowe umowy mogą wpłynąć pozytywnie na stabilność dostaw, ale nie zostały jeszcze wdrożone w pełni, co w polskich warunkach uniemożliwiło wykonania kompleksowych badań.**

## 9. BIBLIOGRAFIA

2030 climate & energy framework. Available online: [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework\\_pl](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_pl) (pobrane 10 lipca 2024).

Agustina, F., Vanany, I., & Siswanto, N. (2018). Biomass Supply Chain Design, Planning and Management: A Review of Literature. 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). doi:10.1109/ieem.2018.8607286

Akhtari S, Sowlati T, Day K. Optimal flow of regional forest biomass to a district heating system. *Int J Energy Res* 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/er.3099>, in press.

Akhtari, S., Sowlati, T., & Day, K. (2014). Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 117–127. doi:10.1016/j.rser.2014.01.058

Atashbar, N. Z., Labadie, N., & Prins, C. (2016). Modeling and optimization of biomass supply chains: A review and a critical look. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 604–615. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.742

Barrette, J., Paré, D., Manka, F., Guindon, L., Bernier, P., & Titus, B. (2018). Forecasting the spatial distribution of logging residues in Canada's managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*. doi:10.1139/cjfr-2018-0080

Bell, J.E.; Mollenkopf, D.A.; Stolze, H.J. Natural resource scarcity and the closed-loop supply chain: a resource-advantage view. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 2013, 43, 351-379. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-03-2012-0092>.

Ben-Iwo, J.; Manovic, V.; Longhurst, P. Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, 63, 172–192 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.050>

Bidzińska G., Ratajczak E. 2003. Polska – UE: Wpływ integracji na rynek pracy w sektorze leśno-drzewnym. *Przemysł Drzewny* 2003, nr 7-8, s. 8-11.

Buchholz, T.; Mason, T.; Springsteen, B.; Gunn, J.; Saah, D. Carbon Life Cycle Assessment on California-Specific Wood Products Industries: Do Data Backup General Default Values for Wood Harvest and Processing? *Forests* 2021, 12, 177. <https://doi.org/10.3390/f12020177>

Buchholz, T.; Mason, T.; Springsteen, B.; Gunn, J.; Saah, D. Carbon Life Cycle Assessment on California-Specific Wood Products Industries: Do Data Backup General Default Values for Wood Harvest and Processing? *Forests* 2021, 12, 177. <https://doi.org/10.3390/f12020177>

Buongiorno, J. Global modelling to predict timber production and prices: The GFPM approach. *Forestry* 2015, 88, 291–303. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu047>

Camero, C., & Sowlati, T. (2014). Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and ecological perspectives – A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 36, 62–73. doi:10.1016/j.rser.2014.04.041

Camia, A., Giuntoli, J., Jonsson, K., Robert, N., Cazzaniga, N., Jasinevičius, G., Avitabile, V., Grassi, G., Barredo Cano, J.I. and Mubareka, S., The use of woody biomass for energy production in the EU, EUR 30548 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-27867-2, doi:10.2760/831621, JRC122719

Campbell, R. M., & Anderson, N. M. (2019). Comprehensive comparative economic evaluation of woody biomass energy from silvicultural fuel treatments. *Journal of Ecological Management*, 250, 109422. doi:10.1016/j.jenvman.2019.109422.

Chai J.; Wang Y.; Wang S.; Wang Y. A decomposition–integration model with dynamic fuzzy reconstruction for crude oil price prediction and the implications for sustainable development. *J. Clean. Prod.* 2019, 229, 775–786. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201900362165> (Pobrano 24 lipca 2024).

Cholewa T. 2000. System zapewnienia jakości w warunkach rynku europejskiego. Interkatedra 2000. Poznań, nr 16/00.

Coady, J., & Duquette, J. (2021). Quantifying the impacts of biomass driven combined heat and power grids in northern rural and remote communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111296. doi:10.1016/j.rser.2021.111296

Coakley, S.; Petti, C. Impacts of the Invasive *Impatiens glandulifera*: Lessons Learned from One of Europe's Top Invasive Species. *Biology* 2021, 10, 619. <https://doi.org/10.3390/biology10070619>

Commission Regulation (EU) 2019/318 of 19 February 2019 amending Regulation (EU) 2017/2400 and Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council as regards the determination of CO2 emissions and fuel consumption of heavy duty vehicles. Available online: <https://40ton.net/ue-zatwierdzilo-nowe-normy-emisji-co2-oraz-zuzycia-paliwa-producenci-ciezarowek-maja-spore-wyzwanie/> (Pobrano 24 lipca 2024).

Conrad, J.L., IV. Costs and Challenges of Log Truck Transportation in Georgia. *Forests* 2018, 9, 650. <http://dx.doi.org/10.3390/f9100650>

Daian, G.; Ozarska, B. Wood waste management practices and strategies to increase sustainability standards in the Australian wooden furniture manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production* 2009, 17, 1594-1602. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.07.008>.

De Meyer A, Cattrysse D, Rasinmäki J, Van Orshoven J. Methods to optimize the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;31:657–70. doi:10.1016/j.rser.2013.12.036

Delgado, O.; Rodriguez, F.; Muncrief, R. Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: 2020–2030. Time Frame. International Council on Clean Transportation Europe, 2017. Available online: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential\\_ICCT-white-paper\\_14072017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf) (Pobrano 24 lipca 2024).

Diebold, F.X.; Mariano, R.S. Comparing predictive accuracy. *Journal of Business and Economic Statistics* 1995, 13, 253-263. Available online: <https://www.sas.upenn.edu/~fdiebold/papers/paper68/pa.dm.pdf> (accessed on 10 November 2022).

Drektywa 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady

Duczkowska, A.; Kulińska, E.; Plutecki, Z.; Rut, J. Sustainable Agro-Biomass Market for Urban Heating Using Centralized District Heating System. *Energies* 2022, 15, 4268. <https://doi.org/10.3390/en15124268>.

Egnell, G. (2016). Effects of slash and stump harvesting after final felling on stand and site productivity in Scots pine and Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 371, 42–49. doi:10.1016/j.foreco.2016.03.006

Eliasson, L., Eriksson, A., & Mohtashami, S. (2017). Analysis of factors affecting productivity and costs for a high-performance chip supply system. *Applied Energy*, 185, 497–505. doi:10.1016/j.apenergy.2016.10.136

EN 1611-1:1999/A1:2002 Sawn Timber-Appearance Grading of Softwoods-Part 1: European Spruces, Firs, Pines, Douglas Fir and Larches. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/69107e18-b016-4b91-b5d1-eeb833e6fe7c/en-1611-1-1999-a1-2002> (Pobrano 24 lipca 2024).

EN 1611-1:1999/A1:2002 Sawn Timber-Appearance Grading of Softwoods-Part 1: European Spruces, Firs, Pines, Douglas Fir and Larches. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/69107e18-b016-4b91-b5d1-eeb833e6fe7c/en-1611-1-1999-a1-2002> (Pobrano 24 lipca 2024).

Encyklopedia leśna. Kaskadowe wykorzystanie drewna. [Httos://encyklopedialesna.pl](https://encyklopedialesna.pl) (Pobrano 24 lipca 2024).

European Green Deal: Commission proposes transformation of EU economy and society to meet climate ambitions Brussels. 14 July 2021

European Parliament resolution of 28 April 2015 on a new EU Forest Strategy: For forests and the forest-based sector (2014/2223(INI)). Available online: [http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126\\_PL.html](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126_PL.html) (Pobrano 24 lipca 2024).

European Parliament resolution of 28 April 2015 on a new EU Forest Strategy: For forests and the forest-based sector (2014/2223(INI)). Available online: [http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126\\_PL.html](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126_PL.html) (Pobrano 24 lipca 2024).

Ghaffariyan MR, Acuna M, Brown M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue supply chain costs: a case study in Western Australia. *Biomass Bioenergy* 2013;59:486–93

Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Bi, X., & Melin, S. (2011). Life cycle assessment of base-load heat sources for district heating system options. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(3), 212–223. doi:10.1007/s11367-011-0259-9

Główny Urząd Statystyczny 2023. Rocznik Statystyczny Leśnictwa 2023. ISSN 2956-8366, Warszawa, Białystok 2023.

Gonzalez, EDS.; Koh, L.; Leung, JMY. Towards a circular economy production system: trends and challenges for operations management, *International Journal of Production Research* 2019, 57, 7209-7218, <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1656844>.

Górna A., Szabelska-Beręsewicz A., Wieruszewski M., Starosta-Grala M., Stanula Z., Kożuch A., Adamowicz K. Predicting post-production biomass prices. *Energies*. 2023, vol. 16 (issue 8), art. no. 3470, DOI: 10.3390/en16083470

Górna A., Szabelska-Beręsewicz A., Wieruszewski M., Starosta-Grala M., Stanula Z., Kożuch A., Adamowicz K. Predicting post-production biomass prices. *Energies*. 2023, vol. 16 (iss. 8), art. no. 3470, DOI: 10.3390/en16083470

Górna A., Wieruszewski M., Szabelska-Beręsewicz A., Stanula Z., Adamowicz K. Biomass price prediction based on the example of Poland. *Forests*. 2022, vol. 13 (iss. 12), art. no. 2179; DOI: 10.3390/f13122179

Górna, A.; Wieruszewski, M.; Szabelska-Beręsewicz, A.; Stanula, Z.; Adamowicz, K. Biomass Price Prediction Based on the Example of Poland. *Forests* 2022, 13, 2179. <https://doi.org/10.3390/f13122179>.

Górna, A.; Wieruszewski, M.; Szabelska-Beręsewicz, A.; Stanula, Z.; Adamowicz, K. Biomass Price Prediction Based on the Example of Poland. *Forests* 2022, 13, 2179. <https://doi.org/10.3390/f13122179>.

Goryunov A. G., Goryunova N.N., Ogunlana A.O., Manenti F., 2016, Production of energy from biomass: near or distant future prospects?, *Chemical Engineering Transactions*, 52, 1219-1224 DOI:10.3303/CET1652204

Green Paper on Forest Protection and Information in the EU: Preparing forests for climate change. Available online: <https://ec.europa.eu/environment/forests/gp.htm> (Pobrano 24 lipca 2024).

Harvey, D.; Leybourne, S.; Newbold, P. Testing the equality of prediction mean squared errors. *International Journal of forecasting* 1997, 13, 281-291. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(96\)00719-4](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(96)00719-4).

Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., and Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-56475-3

He, J., Liu, Y., & Lin, B. (2018). Should China support the development of biomass power generation? *Energy*. doi:10.1016/j.energy.2018.08.136

Helal, M.A.; Anderson, N.; Wei, Y.; Thompson, M. A Review of Biomass-to-Bioenergy Supply Chain Research Using Bibliometric Analysis and Visualization. *Energies* 2023, 16, 1187. <https://doi.org/10.3390/en16031187>

Hofmeister, T. B., Kristjansdottir, T., Time, B., and Wiberg, A. H. (2015). *Life Cycle GHG Emissions from a Wooden Load-Bearing Alternative for a ZEB Office Concept*. Oslo: SINTEF Academic Press.

Hruzik G. J., Wieruszewski M., Gotycz W. 2000. Analiza efektywności produkcji tarcicy iglastej metodą symulacji komputerowej. W: *Drewno – materiał wszechczasów*. Materiały 14 konferencji naukowej WTD-SGGW. Warszawa, s. 107-114.

Hruzik G., Gotycz W., Wieruszewski M., 2005. Efektywność produkcji przykładowych wyrobów tartacznych na rynek krajowy i europejski, *Przemysł Drzewny*, nr 5,

<http://www.zilp.lasy.gov.pl> (Pobrano 24 lipca 2024).

<https://stat.gov.pl> (Pobrano 24 lipca 2024)

<https://www.drewno.pl/> (Pobrano 24 lipca 2024)

<https://www.e-drewno.pl/stock/> (Pobrano 24 lipca 2024)

Hu, X.; He, Y.; Gao, L.; Umer, M.; Guo, Y.; Tan, Q.; Kang, L.; Fang, Z.; Shen, K.; Xia, T. Strategy Trade-Off of Predominant Stress Tolerance Relative to Competition and Reproduction Associated with Plant Functional Traits under Karst Forests. *Forests* 2023, 14, 1258. <https://doi.org/10.3390/f14061258>

International action on climate change. Available online: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change_en). (Pobrano 24 lipca 2024).

Jabłoński K. 2000. Koopetycja w przemyśle drzewnym. W: *Przemysł tartaczny: kooperacja i konkurencja. Materiały konferencji naukowej. Porążyn – Poznań*, s. 1-19.

Jabłoński K. 2000. Koopetycja w przemyśle drzewnym. W: *Przemysł tartaczny: kooperacja i konkurencja. Materiały konferencji naukowej. Porążyn – Poznań*, s. 1-19.

Jeong, J.S. Biomass Feedstock and Climate Change in Agroforestry Systems: Participatory Location and Integration Scenario Analysis of Biomass Power Facilities. *Energies* 2018, 11, 1404. <https://doi.org/10.3390/en11061404>.

Kadam K, Wooley R, Aden A, Nguyen Q, Yancey M, Ferraro F. Softwood forest thinnings as a biomass source for ethanol production: a feasibility study for California. *Biotechnol Prog* 2000; 16: 947–57.

Kamalakkannan, S., & Kulatunga, A. K. (2021). Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1297–1316. doi:10.1016/j.spc.2021.03.006

Kazagic, A., Music, M., Smajevic, I., Ademovic, A., and Redzic, E. (2016). Possibilities and Sustainability of "biomass for Power" Solutions in the Case of a Coal-Based Power Utility. *Clean. Techn Environ. Pol.* 18, 1675–1683. doi:10.1007/s10098-016-1193-

Kolo, H.; Tzanova, P. Forecasting the German forest products trade: A vector error correction model. *JFE* 2017, 26, 35–45. <https://www.nowpublishers.com/article/Details/JFE-0329> (Pobrano 24 lipca 2024).

Kozakiewicz, P.; Krzosek, S. *Inżynieria materiałów drzewnych (Wood material engineering)*. SGGW Warszawa, 2013. [https://www.researchgate.net/publication/295010217\\_Inzynieria\\_materialow\\_drzewnych\\_Engineering\\_of\\_wooden\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/295010217_Inzynieria_materialow_drzewnych_Engineering_of_wooden_materials)

Kożuch, A.; Ankudo–Jankowska, A. 2021. Analiza cen drewna brzoźowego w Polsce oraz wybranych krajach Europy. *Sylwan* 165, 489–500. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2021050>.

Kożuch, A.; Cywicka, D.; Adamowicz, K. A Comparison of Artificial Neural Network and Time Series Models for Timber Price Prediction. *Forests* 2023, 14, 177. <https://doi.org/10.3390/f14020177>.

Kożuch, A.; Cywicka, D.; Adamowicz, K. A Comparison of Artificial Neural Network and Time Series Models for Timber Price Forecasting. *Forests* 2023, 14, 177. <https://doi.org/10.3390/f14020177>.

Krzosek S. 2003. Czy polscy tartacznicy powinni obawiać się europejskich tartaków gigantów. *Rynek Drzewny*. Poznań, nr 3, s. 22-23.

Kupčák V., Pek R. 2015. The Level of the Wood Raw Material Base Processing in the Czech Republic. *Procedia Econ. Financ.*, 34, 557–564. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01668-8](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01668-8).

Kupčák V., Pek R. 2015. The Level of the Wood Raw Material Base Processing in the Czech Republic. *Procedia Econ. Financ.*, 34, 557–564. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01668-8](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01668-8).

Lachowicz, H.; Wysocka-Fijorek, E. Silver birch timber market in Poland in 2008–2012. *Sylwan* 2016, 160, 971–980. <https://doi.org/10.26202/sylvan.2016078>.

Lerma-Arce, V., Oliver-Villanueva, J.-V., & Segura-Orenga, G. (2017). Influence of raw material composition of Mediterranean pinewood on pellet quality. *Biomass and Bioenergy*, 99, 90–96. doi:10.1016/j.biombioe.2017.02.01

Leśkiewicz, K. Realizacja zrównoważonej gospodarki leśnej w wymiarze lokalnym, regionalnym i globalnym—Wybrane aspekty prawne. (Implementation of sustainable forest management in local, regional and global dimensions—selected legal aspects). *Przegląd Prawa Rolnego* 2018, 77–90. <http://dx.doi.org/10.14746/ppr.2018.22.1.5>

Leśkiewicz, K. Realizacja zrównoważonej gospodarki leśnej w wymiarze lokalnym, regionalnym i globalnym—Wybrane aspekty prawne. (Implementation of sustainable forest management in local, regional and global dimensions—selected legal aspects). *Przegląd Prawa Rolnego* 2018, 77–90. <http://dx.doi.org/10.14746/ppr.2018.22.1.5>

Lis W., Popyk W., Tabert M. 2000. Warunki i możliwości rozwoju małych i średnich przedsiębiorstw PD w Polsce na tle wymagań UE. *Interkatedra* 2000. Poznań, nr 16/00.

Litwinowicz-Krakus, J.; Regulski, B. Międzynarodowy aspekt rynku biomasy. <https://magazynbiomasa.pl/rynek-biomasy-i-wszystkie-jego-miedzynarodowe-aspekty/> (Pobrano 24 lipca 2024).

Luo, H.; Niedzwiecki, L.; Arora, A.; Mościcki, K.; Pawlak-Kruczek, H.; Krochmalny, K.; Baranowski, M.; Tiwari, M.; Sharma, A.; Sharma, T.; et al. Influence of Torrefaction and Pelletizing of Sawdust on the Design Parameters of a Fixed Bed Gasifier. *Energies* 2020, 13, 3018. <https://doi.org/10.3390/en13113018>

McKay H. Ecological, economic, social and political drivers for increasing use of woodfuel as a renewable resource in Britain. *Biomass Bioenergy* 2006; 30: 308–15. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.07.008>

Mehrotra, S.N.; Kant, S.; Majumdar, I. Industry Cycles in the US Softwood Lumber Industry: 1985 through 2010. *For. Prod. J.* 2014, 64, 116–125. <https://doi.org/10.1080/07350015.1996.10524645>.

Moskalik, T.; Gendek, A. Production of Chips from Logging Residues and Their Quality for Energy: A Review of European Literature. *Forests* 2019, 10, 262. <https://doi.org/10.3390/f10030262>

Mydlarz K., Wieruszewski M. 2022. Economic, Technological as Well as Environmental and Social Aspects of Local Use of Wood By-Products Generated in Sawmills for Energy Purposes. *Energies*, 15, 1337. <https://doi.org/10.3390/en15041337>

Neykov, N.; Antov, P.; Savov, V. Circular economy opportunities for economic efficiency improvement in wood-based panel industry. 11th International Scientific Conference “Business and Management 2020“. Vilnius, Lithuania, 7-8 May 2020. <https://doi.org/10.3846/bm.2020.493>

Nikodinoska, N., Buonocore, E., Paletto, A., & Franzese, P. P. (2017). Wood-based bioenergy value chain in mountain urban districts: An integrated ecological accounting framework. *Applied Energy*, 186, 197–210. doi:10.1016/j.apenergy.2016.04.07

Paluš, H.; Parobek, J.; Moravčík, M.; Kovalčík, M.; Dzian, M.; Murgaš, V. Projecting Climate Change Potential of Harvested Wood Products under Different Scenarios of Wood Production and Utilization: Study of Slovakia. *Sustainability* 2020, 12, 2510. <https://doi.org/10.3390/su12062510>

PN-EN ISO 9001:2015-10 Systemy zarządzania jakością -- Wymagania

Regulation of the Minister of Infrastructure of 25 January 2018. (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 25 stycznia 2018 r. w sprawie sposobu przewozu ładunku). <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20180000361/O/D20180361.pdf> (pobrano 20 lipca 2024).

Rentizelas, A. A., Tolis, A. I., & Tatsiopoulos, I. P. (2014). Combined Municipal Solid Waste and biomass system optimization for district energy applications. *Waste Management*, 34(1), 36–48. doi:10.1016/j.wasman.2013.09.026

Road Traffic Act of 20 June 1997 (Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 r. o ruchu drogowym.). <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19970980602/U/D19970602Lj.pdf> (Pobrano 24 lipca 2024).

Rozporządzenie Komisji (UE) 2017/2400

Rozporządzeniem Komisji (UE) 2019/318 z dnia 19 lutego 2019

Safarian, S. Climate Impact Comparison of Biomass Combustion and Pyrolysis with Different Applications for Biochar Based on LCA. *Energies* 2023, 16, 5541. <https://doi.org/10.3390/en16145541>

Sgarbossa, A.; Boschiero, M.; Pierobon, F.; Cavalli, R.; Zanetti, M. Comparative Life Cycle Assessment of Bioenergy Production from Different Wood Pellet Supply Chains. *Forests* 2020, 11, 1127. <https://doi.org/10.3390/f11111127>

Sikkema, R.; Steiner, M.; Junginger, M.; Hiegl, W.; Hansen, M.T.; Faaij, A. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2011, 5, 250-278. <https://doi.org/10.1002/bbb.277>.

Silvestro, R.; Saulino, L.; Cavallo, C.; Allevato, E.; Pindozi, S.; Cervelli, E.; Conti, P.; Mazzoleni, S.; Saracino, A. The Footprint of Wildfires on Mediterranean Forest Ecosystem Services in Vesuvius National Park. *Fire* 2021, 4, 95. <https://doi.org/10.3390/fire4040095>

Stanula Z., Bieńkowski S. Wood supply in Poland in relation to the expectations of wood industry. *Intercathedra* nr 29/1, 2013

Stanula Z., Wieruszewski M., Dynowska J., Adamowicz K. 2024 COMPARATIVE EFFICIENCY OF ROUNDWOOD PROCESSING INTO PALLET LUMBER. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2024, Vol. 66 (4), 310–316, w publikacji. DOI: 10.2478/ffp-2024-0023

Stanula Z., Wieruszewski M., Mydlarz K., Adamowicz K. 2023a. Fuel Use Reduction and Economic Savings from Optimization of Road Transportation of Coniferous Roundwood. *Energies*, 16, 5334. <https://doi.org/10.3390/en16145334>

Stanula Z., Wieruszewski M., Zydrón A., Adamowicz K. 2023b. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies*, 16, 7997. <https://doi.org/10.3390/en16247997>

Stanula, Z.; Wieruszewski, M.; Zydrón, A.; Adamowicz, K. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies* 2023, 16, 7997. <https://doi.org/10.3390/en16247997>

Statistical Yearbook of Forestry 2022. Available online: <https://stat.gov.pl/en/topics/agriculture-forestry/forestry/> (Pobrano 24 lipca 2024).

Stolarski, J.; Wierzbicki, S.; Nitkiewicz, S.; Stolarski, M.J. Wood Chip Production Efficiency Depending on Chipper Type. *Energies* 2023, 16, 4894. <https://doi.org/10.3390/en16134894>

Suttles, S.A.; Tyner, W.E.; Shively, G.; Sands, R.D.; Sohngen, B. Business effects of bioenergy policy in the United States and Europe: A general equilibrium approach focusing on forest biomass. *Renew. Energy* 2014, 69, 428–436. [CrossRef]

Tomczak, K.; Latterini, F.; Smarul, N.; Stanula, Z.; Jelonek, T.; Kuźmiński, R.; Łakomy, P.; Tomczak, A. Moisture Content of Fresh Scots Pine Wood in Areas near Damage Caused by Harvester Head Feed Rollers. *Forests* 2023, 14, 1276. <https://doi.org/10.3390/f14061276>

Tsiaras, S.; Andreopoulou, Z. Forest Policy Evaluation in European Countries Using the PROMETHEE Method. *Advances in Operational Research in the Balkans XIII Balkan Conference on Operational Research, Springer Proceedings in Business and Economic*; Mladenović, N., Sifaleras, A., Kuzmanović, M., Eds.; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2020; pp. 95–109. ISBN 978-3-030-21989-5. [https://books.google.pl/books?hl=en&lr=&id=hAilDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA95&ots=NuHyk6rFGm&sig=ZTGnlOhNgIyXHeubvdsIyusaVsw&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pl/books?hl=en&lr=&id=hAilDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA95&ots=NuHyk6rFGm&sig=ZTGnlOhNgIyXHeubvdsIyusaVsw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (Pobrano 24 lipca 2024).

Tunå, P., & Hulteberg, C. Woody biomass-based transportation fuels – A comparative techno-economic study. *Fuel* 2014, 117, 1020–1026. doi:10.1016/j.fuel.2013.10.019

Tunå, P., & Hulteberg, C. (2014). Woody biomass-based transportation fuels – A comparative techno-economic study. *Fuel*, 117(Part B), 1020-1026. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.10.019>

Vlad, I.M.; Toma, E. The Assessment of the Bioeconomy and Biomass Sectors in Central and Eastern European Countries. *Agronomy* 2022, 12, 880-899. <https://doi.org/10.3390/agronomy12040880>.

Walkiewicz, J.; Kawalerczyk, J.; Mirski, R.; Dziurka, D.; Wieruszewski, M. The Application of Various Bark Species as a Fillers for UF Resin in Plywood Manufacturing. *Materials* 2022, 15, 7201. <https://doi.org/10.3390/ma15207201>.

Wiederkehr, P.; Gilbert, R.; Crist, P.; Caïd, N. Environmentally Sustainable Transport (EST): Concept, Goal, and Strategy—The OECD’s EST Project<sup>1</sup>. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/313697298\\_Environmentally\\_Sustainable\\_Transport\\_EST\\_Concept\\_Goal\\_and\\_Strategy-The\\_OECD](https://www.researchgate.net/publication/313697298_Environmentally_Sustainable_Transport_EST_Concept_Goal_and_Strategy-The_OECD) (Pobrano 24 lipca 2024).

Wieruszewski M., Mydlarz K. The potential of the bioenergy market in the European Union - an overview of energy biomass resources. *Energies*. 2022, vol. 15 (iss. 24), art. no. 9601 DOI: 10.3390/en15249601

Yagi, K., & Nakata, T. (2011). Economic analysis on small-scale forest biomass gasification considering geographical resources distribution and technical characteristics. *Biomass and Bioenergy*, 35(7), 2883–2892. doi:10.1016/j.biombioe.2011.03.03.

Yu Q, Wang Y, Van Le Q, Yang H, Hosseinzadeh-Bandbafha H, Yang Y, Sonne C, Tabatabaei M, Lam SS and Peng W (2021) An Overview on the Conversion of Forest Biomass into Bioenergy. *Front. Energy Res.* 9:684234. doi: 10.3389/fenrg.2021.684234

Zarządzenie nr 97 DGLP z dnia 12 października 2023 r. ws zasad sprzedaży drewna w PGL LP

Zhai, J.; Burke, I.T.; Stewart, D.I. Beneficial management of biomass combustion ashes. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* 2021, 151, 111555 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111555>

Zhang, F., Johnson, D. M., & Wang, J. (2015). Life-cycle energy and GHG emissions of forest biomass harvest and transport for biofuel production in Michigan. *Energies*, 8(4), 3258-3271. <http://dx.doi.org/10.3390/en8043258>

Zhang, F., Johnson, D. M., & Wang, J. (2015). Life-cycle energy and GHG emissions of forest biomass harvest and transport for biofuel production in Michigan. *Energies*, 8(4), 3258-3271. <http://dx.doi.org/10.3390/en8043258>

Zwirgmaier, K. Seasonality of Prices—The Example of German Timber Prices. *Technische Universität München*. 2010. Available online: [http://www.gipecofor.org/doc/drupal/liens\\_article/evenements/2010/ZWIRGLMAIER\\_IUFRO\\_Paris\\_Mai2010.pdf](http://www.gipecofor.org/doc/drupal/liens_article/evenements/2010/ZWIRGLMAIER_IUFRO_Paris_Mai2010.pdf) (Pobrano 24 lipca 2024).

## **Streszczenie w języku polskim**

Zrównoważony rozwój branży Leśno drzewnej wymaga połączenia ekonomicznych aspektów praktyk leśnych z działalnością sektorów drzewnych. Uwzględnienie czynników ekologicznych i ekonomicznych gwarantuje bezpieczeństwo działalności przedsiębiorstw oraz strefy społecznej. Gospodarka leśna oparta na zasadach utrzymania dobrostanów biologicznych w Polsce stanowi również podstawowy obszar zabezpieczenia potrzeb produkcyjno-społecznych. Pierwszym elementem tego działania jest dostęp do drewna, czyli surowca stanowiącego podstawowy materiał odnawialny do zastosowania gospodarczego. Działania związane z zagospodarowaniem zasobów drzewnych związane są ze stanem i dostępnością drzewostanów. Drugi zakres obejmuje produkcję i transport surowca drzewnego do odbiorców. Pod tym pojęciem rozumiane są koszty ekonomiczno-środowiskowe, czyli zagrożenia związane z oddziaływaniem środków transportu na środowisko naturalne. Z pozyskaniem surowca drzewnego związane są działania logistyczne wpływające na jego racjonalne przemieszczanie. Jednocześnie kwestie ekonomiczne przekładają się na optymalizację tego procesu, czego konsekwencją jest ograniczenie dystansu i ładowności przemieszanego drewna. Prognozy dotyczące zmian dostępności i wartości zasobów surowca drzewnego, dostarczają informacji dla procesów logistycznych i ekonomicznych w sektorze leśno-drzewnym.

Głównym celem pracy było zweryfikowanie zależności obiegu zamkniętego dla rynku surowca drzewnego i biomasy przemysłowej oraz ich transportu. Określono założenia, które pozwolą na określenie zmienności ekonomicznej w obrocie drewnem. Będzie to miało wpływ na optymalizację kosztów w kontekście aspektów ekonomicznych i środowiskowych pozyskania i przerobu drewna. Można wskazać zasadność podjęcia działań zmierzających do optymalizacji logistycznej i ekonomicznej, z uwzględnieniem aspektów środowiskowych zarówno w skali lokalnej jak i globalnej.

Wyniki wskazują, że biomasa leśna i produkty drzewne mają potencjał w redukcji kosztów środowiskowych. Wprowadzenie optymalizacji w cyklu życia produktu, może przynieść korzyści społeczne i środowiskowe. Takie elementy jak łańcuchy dostaw biomasy drzewnej, ocena procesu decyzyjnego oraz optymalizacja ekonomiczna, co przyczynia się do osiągnięcia korzyści społecznych. Zagrożenie stanowią odchylenia cen biomasy oraz produktów ubocznych przerobu drewna, wynikające z czynników rynkowych oraz wahań sezonowych. Uzyskiwana efektywność produkcji wyrobów z drewna, jest silnie związana z relacją cenową pomiędzy surowcem a produktami. Wskaźnik ten związany jest silnie z wartością dodaną produktów ubocznych.

## **Streszczenie w języku angielskim**

Sustainable development of the forestry and timber industry requires combining the economic aspects of forestry practices with the activities of the timber sectors. Taking ecological and economic factors into account guarantees the security of business operations and the social zone. Forest management based on the principles of maintaining biological well-being in Poland is also a fundamental area for securing production and social needs. The first element of this activity is access to timber, which is the basic renewable material for economic use. Activities related to the management of wood resources are related to the condition and availability of stands. The second scope includes the production and transport of wood raw material to consumers. Under this umbrella are understood the economic and environmental costs, i.e. the risks associated with the environmental impact of means of transport. The harvesting of wood raw material is related to logistical activities affecting its rational transportation. At the same time, economic issues translate into optimisation of this process, resulting in a reduction in the distance and payload of the shipped timber. Forecasts of changes in the availability and value of wood resources, provide information for logistical and economic processes in the forest-wood sector.

The main objective of the study was to verify the closed loop relationship for the market of raw wood and industrial biomass and their transport. Assumptions were identified to determine the economic variability in the timber trade. This will have an impact on cost optimisation in the context of the economic and environmental aspects of timber harvesting and processing. The rationale for undertaking logistical and economic optimisation measures, taking into account environmental aspects both locally and globally, can be indicated.

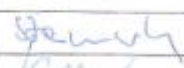

The results indicate that forest biomass and wood products have the potential to reduce environmental costs. Introducing optimisation in the product life cycle, can bring social and environmental benefits. Elements such as wood biomass supply chains, decision-making evaluation and economic optimisation, which contributes to social benefits. The price variation of biomass and wood by-products due to market factors and seasonal fluctuations is a threat. The efficiency achieved in the production of wood products, is strongly related to the price relationship between raw material and products. This indicator is strongly related to the added value of by-products.

## Oświadczenia autorów o współudziale w publikacji

Poznań, 10.10.2024 r.

### Oświadczenie o współudziale

Oświadczamy, że w artykule: Stanuła Zygmunt, Bienkowski S.. Wood supply in Poland in relation to the expectations of wood industry. Intercathedra nr 29/1, 2013, wkład poszczególnych Autorów w powstanie publikacji jest następujący:

Lp.	Imię i Nazwisko Autora	Wkład procentowy	Podpis
1.	Zygmunt Stanuła	70%	
2.	Stanisław Bienkowski	30%	
3.			
4.			
5.			

Oświadczenie o współautorstwie




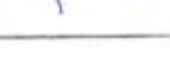
Oświadczam, że w artykule: Nowak, Z.; Wiercowski, M.; Żybiński, A.; Adamowicz, K. Optimizing Forest Harvest Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review, Energies 2023, 16, 1997. <https://doi.org/10.3390/en16121997>, wkładem poszczególnych autorów w powstanie cytowanego jest następujący:

Lp.	Wzrost Nazwiska i.2024	Wzrost procentowy	Procent
1.	Dziurka Stanisław	40%	[Signature]
2.	Murci Wiercowski	15%	
3.	Adam Żybiński	25%	[Signature]
4.	Krzysztof Adamowicz	20%	
5.			

Poznań, 10.10.2024 r.

**Oświadczenie o współudziale**


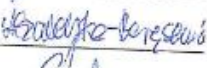



Oświadczamy, że w artykule: **Stanuła Zygmunt, Wieruszewski Marek, Mydlarz Katarzyna, Adamowicz Krzysztof**: Fuel use reduction and economic savings from optimization of road transportation of coniferous roundwood. *Energies*. 2023, vol. 16 (iss. 14), art. no. 5334 ; DOI: [10.3390/en16145334](https://doi.org/10.3390/en16145334), wkład poszczególnych Autorów w powstanie publikacji jest następujący:

Lp.	Imię i Nazwisko Autora	Wkład procentowy	Podpis
1.	Zygmunt Stanuła	45%	
2.	Marek Wieruszewski	20%	
3.	Katarzyna Mydlarz	20%	
4.	Krzysztof Adamowicz	15%	
5.			

Poznań, 15.05.2023 r.

**Oświadczenie o współudziale**




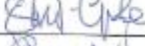
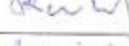


Oświadczamy, że w artykule: Górna Aleksandra, Wieruszewski Marek, Szabelska-Beręsewicz Alicja, Stanula Zygmunt, Adamowicz Krzysztof; *Biomass price prediction based on the example of Poland*; *Forests*. 2022, vol. 13 (iss. 12), art. no. 2179, wkład poszczególnych Autorów w powstanie publikacji jest następujący:

Lp.	Imię i Nazwisko Autora	Wkład procentowy	Podpis
1.	Aleksandra Górna	30%	
2.	Alicja Szabelska-Beręsewicz	15%	
3.	Marek Wieruszewski	15%	
4.	Zygmunt Stanula	25%	
5.	Krzysztof Adamowicz	15%	

Poznań, 15.05.2023 r.

**Oświadczenie o współdzieleniu**




Oświadczamy, że w artykule: Górna Aleksandra, Szabelska-Beręsewicz Alicja, Wieruszewski Marek, Starosta-Grała Monika, Stanuła Zygmunt, Kożuch Anna, Adamowicz Krzysztof; *Predicting post-production biomass prices*; *Energies*. 2023, vol. 16 (iss. 8), art. no. 3470, wkład poszczególnych Autorów w powstanie publikacji jest następujący:

Lp.	Imię i Nazwisko Autora	Wkład procentowy	Podpis
1.	Aleksandra Górna	30%	
2.	Alicja Szabelska-Beręsewicz	10%	
3.	Marek Wieruszewski	10%	
4.	Monika Starosta-Grała	10%	
5.	Zygmunt Stanuła	20%	
6.	Anna Kożuch	10%	
7.	Krzysztof Adamowicz	10%	

Warszawa, 18.10.2024 r.

**Oświadczanie o oryginalności**

Oświadczam, że w artykule: *Skuteczność Ergonomii Wzrostowa Młoci, Długość Trzonu, Anatomia Krczostki. Comparative efficiency of musculoskeletal processing into pollen pollen. Język: włoski* (Journal of Human Ergology, 2024, w przygotowaniu), w której opisywałem dane w procesie publikacji jest oryginalne.

№	imię i nazwisko autora	Wzrost procentowy	Podpis
1.	Ergonom Skuteczność	100%	
2.	Marek Wieruszewski	100%	
3.	Monika Dębnińska	100%	
4.	Instytut Anatomii	100%	
5.			

## **Kopie publikacji będące podstawą do rozprawy doktorskiej**

1. **Stanula Z.**, Bieńkowski S. Wood supply in Poland in relation to the expectations of wood industry. Intercathedra nr 29/1, 2013. (#1)



*Zygmunt Stanula, Stanisław Bienkowski<sup>31</sup>*

## WOOD SUPPLY IN POLAND IN RELATION TO THE EXPECTATIONS OF WOOD INDUSTRY

Wood, xylem (ksylos in Greek means wood) is the name for a compound heterogeneous plant tissue which is created in the process of vascular plants growth. Depending on the fundamental directions of its anatomy (longitudinal radial, longitudinal tangential and transverse) it manifests various mechanical characteristics. As an organic renewable resource, it has been accompanying people on everyday basis since prehistoric times. Civilization development has also promoted wood utilization as a resource essential for distinct areas or developing industry. It has been currently estimated that wood is used in over 10 thousand applications<sup>32</sup>. The versatility and in numerous cases even irrevocability of wood usage makes it a highly desirable resource. Its temporary shortage causes many conflicts between the sellers and the buyers as well as the recipients themselves.

### MONOPOLY OF THE STATE FORESTS NATIONAL FOREST HOLDING

According to the data of Central Statistical Office the area of forests in Poland currently amounts to 9 329 thousands of square hectares. Due to the subsidies which were implemented in Poland following our accession to the European Union and which embraced farmers who decided to plant forest on their grounds the ownership structure of Polish forests has recently changed. From year to year there has been a small increase in the share of private forests. Even though privately owned forests currently account for over 18% of the total forest area in Poland (table 1), those forests are very fragmented and individual owners hardly ever possess forest area large enough to justify implementing rational forest policy. In our country the domineering model is the one where forest only accompanies the main farming activities „An average area of private forest amounts to 0,54 ha, while an average forest area at a farm is over twice that size approximately 1,30 ha.”<sup>33</sup> In such situation private forest owners are not really interested in active forest management. Additionally they do not possess specialized equipment which forces them to use expensive services of external companies or do that themselves which does not favor rational sales of possessed wooden resources. Most frequently it is being used for their own purposes especially as a heating fuel. Such management induces the situation where supply of round wood from private producers is marginal and annually amounts to 3-4% (Table 2). Resources from private forests are treated by wood recipients processing them further as an additional source of cheap round wood which does not have any significant impact on the production of the majority of those recipients.

Analyzing table 1 and 2 – one may state that due to its forest area owned as well as average annual size of round wood being possessed, which amounts to approximately 95% of wood supply State Forests National Forest Holding may be considered an undisputed monopolist and in many cases it is the sole wood provider (natural monopolist). Due to its substantial dominance in the supply of wood onto domestic market State Forests National Forest Holding fully controls wood sales in Poland. Moreover, despite the fact that forests are owned by Polish State Treasury according to §8 paragraph 1 point 5 of National Forests Status which has been binding as of 18th May 1994, (...), „General Director determines especially: (...) the rules of wood sales by National Forests” (...) That record clearly establishes that the supreme right to set the rules concerning wood

<sup>31</sup> Stelmet Sp. z o.o. S.K.A., Gorzowska 20, 65-127 Zielona Góra, Poland, tel.: 0048 68 329 38 96, fax.: 0048 329 38 07, z.stanula@stelmet.com, s.bienkowski@stelmet.com

<sup>32</sup> According to: W. Kokociński: *Anatomia drewna*. Poznań AR 2002. page.5

<sup>33</sup> P. Gólos, S. Zajęc. *Stan lasów prywatnych i perspektywy ich rozwoju*. W: *Polityka Leśna Państwa i Narodowy Program Leśny*. Warszawa 2005. page.36



sales is the sole responsibility of National Forests General Director, who while making such important decision has a special duty to take into account the needs of wood industry.

Table 1. Forests ownership structure in %

Elements	Year									
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
	[%]									
Public in total, including:	82,6	82,6	82,5	82,5	82,3	82,2	82,1	82,0	81,8	81,5
those under State Forests management	78,3	78,3	78,3	78,3	78,2	78,1	78,0	77,9	77,8	77,5
Private	17,4	17,4	17,5	17,5	17,7	17,8	17,9	18,0	18,2	18,5

Source: *Leśnictwo 2011, Central Statistical Office, Warszawa 2011*

Table 2. Wood acquisition

Elements	Year					
	2000	2005	2007	2008	2009	2010
	[thousand m <sup>3</sup> ]					
Total, including:	27659	31945	35935	34273	34629	35467
Merchantable bole, including:	26025	29725	34146	32407	32701	33568
Public forests, including:	24593	28601	32797	31159	31612	33568
Those owned by Polish State Treasury, including:	24446	28472	32657	31011	31482	32325
State Forests National Forest Holding	24097	28164	32314	30695	31188	31882
National Parks	231	198	234	216	192	201
Owned by communities	147	129	140	147	130	131
Private forest	1432	1124	1349	1248	1089	1243
Small-sized timber	1634	2200	1789	1866	1928	1899
Rootwood	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1

Source: *Leśnictwo 2011, Central Statistical Office, Warszawa 2011*

## STATE FORESTS NATIONAL FOREST HOLDING WOOD SALES RULES

Until 2006 practically the only form of wholesale of round wood in Poland was through trade negotiations and contracts were signed with individual forest districts, regional or general directorates. In case of the sales of the most precious type of wood periodical submissions have been and still are in practice. In 2006 new rules of wood sales were introduced – forest and wood portal was set up and an Internet system of wood sales was implemented by State Forests. Its aim was to bring along a full transparency of all operations related to wood trade. Its authors also assumed that it should have diminished the so called gray area in the sales of that product. During the subsequent years of sales carried out via that Internet tool the process has been undergoing



various changes and modifications. In its current form it provides wood sales for clients representing wood industry in the following stages:

- Internet limited auctions on forest and wood portal are informally called "portal". Since 2009 such auctions have been organized every six months and they are restricted only to those clients who have a so called "purchase history"; that is they bought round wood from State Forests in the previous year.

- System Internet auctions using application called: „e-drewno”, are referred to as „e-system auctions”. They are also organized every half a year. They have a form of open internet auctions which can be attended by every company or an individual following deposit payment.

- Internet auctions in „e-drewno” applications are informally called „e-drewno”. Those in terms of rules governing them are identical with system Internet auctions and the only difference is that they are organized very irregularly throughout the whole year.

- Other auctions and submissions – are open auctions of especially valuable types of wood (such as veneer wood). Sales are often very individual in nature as they may concern one log only.

Wood sales system in Poland has been and still is causing a lot of controversies and conflicts between State Forests and representatives of wood industry. Wood industry has been continually accusing State Forests of monopolistic practices on the side of wood supply. The decisions of present State Forests Director, who this year appointed an advisory group consisting of the representatives of various wood industry sectors as well as National Forests brings along a lot of optimism. This group drafted a project of changes in the current system of wood sales, which apart from a series of facilitations for the buyer also envisages the implementation of long-term contracts for wood supply which should result in at least partial stabilization of wood market in Poland.

#### **CLASSIFICATION OF TIMBER OFFERED BY STATE FORESTS**

State Forests offer merchantable timber in four basic trade categories that is: small-sized timber, medium-sized timber and large-sized timber as well as rootwood. Individual sectors of wood industry try to adjust the profile of its production to the resources available on the market. However even at this stage there have been conflicts of interest being the result of the possibilities of using the resources on offer, for example on one hand energy industry is able to use the whole volume of timber sold (and burn it all), while on the other hand for the production of veneer or lathed elements there is a demand for a specially selected material.

Small-sized timber so called „slash”. It's characteristics are diameter up to 7 cm with bark at a lower, thicker end, sufficient snagging and allowing for the majority of faults among them large curvature and fall-off. This material is offered in a form of pole-wood and slash assigned for heating. Elements classified within that group are used mainly by pulp and paper industry as well as the sector of wood-based materials and for heating purposes. All of that influences its price which in comparison with the remaining trade groups is the lowest. With an exception of M1P0 (small-sized coniferous timber assigned for mechanical processing) – it is material obtained in small quantity, specially selected for specific characteristics used by the producers of garden architecture for lathed elements and its price often exceeds the price of large-sized timber.

Small-sized timber used by pulp and paper industry and the sector of wood-based materials during processing is being further fragmented into chips. In that case one can state that there are no significant differences between the recipients' expectations and the products offered by State Forests. The most controversies arise from a large number or curvatures and defects in snagging, which has negative effects on material efficiency as well as the possibility of optimal usage of transport space which significantly increases the overall costs of transport.

Medium-sized timber (S), is the material of top diameter ( at a thinner end) without bark of 5 cm and more. Depending on the harvested material it is measured individually in groups or piles. The most typically offered material is a so-called „pulpwood”, which can be obtained on the market



in S2A standard (that is medium-sized timber for industrial usage) and S2B (medium-sized usable timber). Division into material S2A and S2B was introduced a long time ago but only this year, present General Director of State Forests issued a directive number 34 dated 17 April 2012 which regulates standard technical requirements for both groups of material. Currently it may be stated that this directive finished a conflict that lasted for many years and related to the quality and measurements of medium-sized timber: S2A and S2B offered by State Forests and a compromise has been found that was accepted by both the seller as well as the buyer.

The remaining elements from that group of medium-sized timber, yet offered by State Forests in significantly lower quantities are: S3 (poles), S4 (fuel wood), S10 (mine-timber) and S11 (pillars). Wood material from that category is used in pulp and paper industry, sector producing wood-based materials and only recently in wood industry sectors producing wood garden architecture and pallets.

Large-sized timber (W) is the material of top diameter (at a thinner end) from 14 cm without bark, measured in individual units or in case of logged wood, due to the onerousness of so called „individualized“<sup>34</sup> receipt an alternative receipt in piles just like in case of medium-sized timber is also accepted. In a group of large-sized timber there are two subgroups: large-sized timber for general usage and special large-sized timber.

In case of the latter one, that is so called material with choice, which constitutes timber classified as valuable (informally called: veneer, plywood, match-stock, tele-energetic or tele-technical wooden pylons) there have not been any major complains concerning its form and quality as it is regulated by clear norms which have been accepted by both the recipients and State Forests.

The most controversial has been material from large-sized timber assigned for general usage called W\_STANDARD, in case of which there have been major discrepancies between industry expectations and what State Forests have been offering. In terms of its quality as well the length and class. The recipients of that material are mainly: sawmills as well as the producers of wood garden architecture who due to the character of their products expect certain features from the round wood which they purchase. Also the wood packaging industry especially pallets sector uses in its production approximately 20% of large-sized timber of lower quality classes (C and D; 80% of it is pulpwood = that is medium-sized timber: S2A and S2B). On one hand the material should meet their quality standards on the other it should have acceptable price.

In group: W\_STANDARD there are 4 quality classes (A, B, C, D) and 3 classes related to thickness (1, 2, 3), which in total make up 11 types of material. The best and simultaneously the most expensive quality classes A and B constitute on average up to 20% of the material offered in W\_STANDARD; while the differences in prize between the subsequent quality and size classes amount to a dozen to several dozens PLN. Quality class C meets both the expectations of sawmills as well as producers of garden architecture<sup>35</sup>. Receipt of material in quality classes: A, B and D exposes them to unjustifiable economic loss, as the products manufactured using material from quality classes A and B (a much more expensive material) will not be obtained at a higher cost and the material from class D, due to its acceptable defects – in many cases does not meet sawing criteria. It can be stated that each quality group of large-sized timber offered individually would find its recipient as timber of A and B class is a highly demanded by the producers of plywood and veneer and class D may be successfully used by pulp and paper industry as well as the producers of wood-based materials.

Sales of merchantable timber of W\_STANDARD in its current form is convenient only for the sellers as it saves them costs and problems related to separation of large-sized timber which becomes a sole responsibility of the buyer. A kind of solution for this problem seems to be a gradual

<sup>34</sup>Method of receiving round wood based on individual assessment and receipt of each unit. – annotation by Z. Stanula

<sup>35</sup> Informal name used for production of garden architecture made of wood. Annotation by S. Bieńkowski



introduction of logged wood into the sales of State Forests. However the one being currently on offer only partially meets the expectations of sawmill industry (very rarely being available in quality classes A, B and D). It is offered in individual lengths in thickness classes. The buyer bearing in mind the variety of its products is not able to use the whole of the purchase in an optimal way. Therefore part of that timber is sawn with a substantial material loss. Also the quality of logs on offer seems to be far from ideal as in majority of cases they are possessed by harvesters. Very often during machinery operations some of the logs are being incidentally debarked which deprived of its natural protective layer in a form of bark significantly faster due to changeable weather conditions loses its value.

Rootwood (K) is a material possessed in marginal quantity (from 100 to 200 m<sup>3</sup> per year - table 2). It is obtained from whole rootwood – it is so called stump wood or splint rootwood divided into chips.

Sales of merchantable timber in Poland currently induces a lot of emotions both on the side of the seller as well as the buyers. The most controversies arise from the conditions of sales as well as the quality and division of the material offered. Negotiations between the representatives of State Forests and wood industry that have been carried out for a long time now have been gradually bringing positive results what was proved by introducing in 2012 basic technical standards for medium-sized wood: S2A and S2B as well as determining changes that will be binding as of the beginning of 2013 in currently used sales regulations which in a way threaten both the interests of the seller as well as the buyer. Unfortunately, there have still been many debatable issues that require further talks and negotiations. Let us hope that in the future they will be solved and stabilization in the unstable wood industry will be achieved.

#### REFERENCES

1. Gołos P., Zajac S. : Polityka Leśna Państwa i Narodowy Program Leśny. Warszawa 2005
2. Kokociński W.: Anatomia drewna. Poznań AR 2002
3. Leśnictwo 2011. Główny Urząd Statystyczny. Warszawa 2011
4. Rynek drewna w Polsce – w drodze ku stabilizacji. Broszura informacyjna. Poznań 2007
5. Statut Państwowego Gospodarstwa Leśnego Lasy Państwowe, nadany zarządzeniem nr 50 Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 18 maja 1994 r.
6. [http:// www.lasy.gov.pl](http://www.lasy.gov.pl)
7. <http://www.zilp.lasy.gov.pl>

2. **Stanula, Z.**; Wieruszewski, M.; Zydrón, A.; Adamowicz, K. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies* 2023, 16, 7997. DOI: 10.3390/en16247997 (#2)

Review

# Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review

Zygmunt Stanula <sup>1</sup>, Marek Wieruszewski <sup>2,\*</sup>, Adam Zydrón <sup>3</sup> and Krzysztof Adamowicz <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Forestry Business and Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland; zygmunt.stanula@up.poznan.pl (Z.S.); krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl (K.A.)

<sup>2</sup> Department Mechanical Wood Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland

<sup>3</sup> Department of Land Reclamation, Ecological and Spatial Management, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland; adzydr@up.poznan.pl

\* Correspondence: marek.wieruszewski@up.poznan.pl

**Abstract:** Forest and wood biomass represent a sustainable reservoir of raw materials and energy, offering a viable alternative to fossil fuels. These resources find extensive use in producing bio-products, including solid wood and wood materials. The judicious exploitation of forest and wood biomass can be pivotal in reducing carbon emissions and securing material and energy independence. The business viability of producing valuable goods from woody biomass hinges on ensuring its sustained availability. This necessitates access to high-quality biomass at a minimal cost, demanding the efficient design of wood-biomass-distribution logistics. Furthermore, it is imperative to give equal weight to social and ecological considerations in shaping the forest- and wood-biomass-distribution logistics, thereby ensuring the sustainable utilization of this renewable raw material source. This article presents research focused on the business optimization of distribution logistics for specific forms of forest biomass used in wood material production. While most studies have primarily concentrated on the business or ecological issues of biomass utilization, this article offers a comprehensive insight by addressing business, ecological, and social facets in assessing and optimizing wood-biomass-distribution logistics. Multi-stakeholder life-cycle-assessment optimization takes into account the reduction of greenhouse gases as an ecological metric, with production costs and capital expenditure forming the business metrics. At the same time, the generation of employment opportunities is commonly regarded as the pivotal social criterion. There remains a necessity for further exploration into the potential social impacts of forest biomass utilization. Additionally, developing enhanced methodologies and decision-support tools for scheduling wood-biomass-distribution logistics that holistically consider business, ecological, and social criteria is an essential ongoing task.

**Keywords:** biomass; wood; business optimization; ecological optimization; social optimization; distribution logistics; life cycle



Citation: Stanula, Z.; Wieruszewski, M.; Zydrón, A.; Adamowicz, K. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies* 2023, 16, 7997. <https://doi.org/10.3390/en16247997>

Academic Editor: Antonio Galvagno

Received: 1 November 2023

Revised: 5 December 2023

Accepted: 8 December 2023

Published: 10 December 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Intensification of forestry production is increasing the use of biomass to replace fossil materials for social needs and to produce electricity, fuels [1,2], and various chemicals, plastics, and other wood materials. The International Energy Agency encourages using biomass residues for energy production, as this can help achieve energy independence without destabilizing the world's timber resources [3]. Some countries have an excess of wood waste and solid wood waste that is generated during the manufacturing of forest and wood products. It is possible to produce valuable products from woody biomass, and the by-products, in many cases, are diverted to incineration [4–6]. Despite the benefits of using woody biomass as a renewable resource, the technological challenges of harvesting it

and the business costs hinder its intensification. Forest resources are scattered, increasing the collection, handling, and transportation costs.

In addition, there is a wide variation in the quality of harvested woody biomass due to the type of raw material, access to forest resources, climatic conditions, pre-preparation, transportation, and storage, and there is competition from other industry players or end users [7,8]. Woody biomass often has a lower value than a large number of competing non-renewable resources [9,10]. This results in a relatively higher cost and more difficult logistics for harvesting, transporting, and processing woody biomass. Biomass logistics costs typically account for 10–30% of the cost of delivered wood [11,12] and often limit the competitiveness of woody biomass. A business-efficient woody biomass distribution logistics design is critical to overcoming market challenges. In addition, increasing public awareness of sustainability requires government officials in developed countries to understand the ecological and social impacts of the forest- and wood-biomass life cycle.

Quantitative modeling techniques can help understand the business, ecological, and social impacts of woody biomass distribution logistics. This understanding is again required to mitigate the undesirable effects of business development, increase the benefits of the biomass distribution logistics, ensure the sustainable use of biomass, and ensure the sustainable development of new products that should receive the interest and support of communities, the government of developed countries, and businesses.

Numerous studies to date have evaluated various woody biomass distribution logistics [4–6,13–19]. Scheduling and management of distribution logistics from biomass purchase to distribution has been presented [18,19] and classified in numerous studies [13,14,20], emphasizing strategic, tactical, and operational levels of decision scheduling. Modeling methods to support decision making in the area of biomass distribution logistics is part of the references [15–18].

Previous studies [3,11] have conducted modeling with uncertainty in the optimization process of forest- and wood-biomass-distribution logistics [10]. Most of the studies conducted focused exclusively on the business aspect of biomass distribution logistics in the form of roundwood and forest waste. Reference to issues of social and ecological influences on optimization included only a few factors considered in developing assumptions for woody biomass distribution logistics [4,14–16,20,21]. More recently, business, ecological, and social factors have begun to be integrated (according to factor weighting) in the evaluation and optimization of forest-biomass-distribution logistics. In this regard, it is time to review and discuss existing research on the integration of selected issues of sustainability and scheduling of forest- and wood-biomass-distribution logistics.

## 2. Review Methods

This article presents research on the development of modeling in the evaluation and optimization of business, ecological and social criteria in the scheduling of forest- and wood-biomass-distribution logistics for the production of energy, fuels, and other wood products (e.g., structural timber and lumber). First, we explain the technological, business, ecological, and social purpose involved in designing forest-biomass-distribution logistics. Next, we review the technological and business and ecological LCA (life-cycle) assessments of woody biomass, integrated business, social, and ecological assessments for multi-level optimization modeling. We discuss the characteristic features and limitations of each of these approaches, as well as suggestions for further research.

The literature review method was based on verification of the sources of Science Direct, MDPI, Springer Link, Science, Scopus, and Web of Science in such a way as to illuminate to the readers the main path of the ongoing research on optimization of the principles of utilizing forest and wood biomass for energy purposes.

Given the thematic scope of the biomass flow-modeling issues under consideration, the study is limited to forest and wood biomass. Data from Renewable Energy and the Joint Wood Energy Enquiry were used to make a detailed assessment of the use of forest and woody biomass used for energy production, supplemented by data from the

EU's Joint Forestry and Timber Sector Statement. Analyses of reports presented by the European Statistical Office Eurostat were also used. The results presented in the article are derived from the literature on the optimization and development of forest biomass flow modeling and in-depth analysis of the balance of woody resources (WRB) based on the data mentioned above and global data sources.

### 3. Description of the State of Knowledge

#### 3.1. Sustainability in Forest-Biomass-Distribution Logistics

The principles of sustainable development and the utilization of both woody and forest biomass resources require that the benefits of their current use do not jeopardize the security of future generations [22]. It is important to take technological, business, environmental, and social issues into account when designing forest-biomass-distribution logistics [23].

##### 3.1.1. Technological and Business Considerations

The process of expanding the use of wood biomass to produce finished products and bioenergy may, in addition to costs, constitute an additional source of business revenue for the forestry and wood sector. Integrated processing can improve the profitability of forestry and timber companies [24–27]. To make this feasible, the technological and business issues of the distribution logistics need to be combined. These are essential elements that should be taken into account when scheduling new directions for the use of forest and wood biomass. The most important technological issues taken into account in the design of biomass processing are its type, efficiency, and scale of the processing technologies selected for implementation. The choice of forest- and wood-biomass processing technology is based on information regarding the form of the desired product and the type of accessible biomass. Modern processing technologies are increasingly better suited to the rational transformation of forest and wood biomass into finished products for individual or social utility or ultimately into an energy source [28,29]. The efficiency of wood material processing is determined by the amount created from a unit of wood biomass input accessible for a given technology. Higher efficiency means lower operating costs, but usually involves higher capital expenditure [26–29]. The size of the processing technology used affects the business parameters of production. Since preprocessing costs are high, it is important to achieve benefits by increasing the scale of production and deepening the level of processing [30,31].

The operational scale of processing is technologically limited by the defined amount of accessible wood biomass, and business is limited by the cost of biomass delivered to companies for energy purposes. This highlights the need to maintain a reliable and business-viable supply of forest and wood biomass. The parameters for forest biomass that influence the technological and ecological feasibility of its use are its quality characteristics, availability, and overall cost of acquisition. The features of assessing the quality of biomass include its size and structure, anatomical features, and the degree of mechanical and biological damage [9,10,32–34]. These parameters influence the choice of the type of pre-treatment (e.g., sorting, processing, etc.), the choice of processing technology, the efficiency and cost of transport, and the amount of biomass that can sustainably determine the scale of processing. The logistic variability of biomass supplies over time determines the need for its storage to ensure access to the raw material throughout the entire processing period. The costs of purchasing biomass include all costs related to obtaining, storing, pre-processing, and transporting biomass from the source (forest) to the plant. Another critical factor affecting the business of using forest and wood biomass to produce valuable products is the cost of product distribution. In the case of products that are made of wood and wood-based materials, distribution activities should be planned. In most countries, circular distribution is the most common business-distribution alternative for furniture, lumber and wooden structural elements, and fuels. The cost of transport is often influenced by the physical properties of some products (external dimensions, fragmentation, irregular shape),

which make it difficult to use transport infrastructure, mainly road transport [11,23,31] and, therefore, alternative forms of transport should be considered.

A combination of decision-making factors influences the technological and business success of using woody biomass in markets in business and social terms. Effective distribution logistics require decisions regarding raw materials (source of origin and generic diversity); storage, pre-treatment and transportation (method, volume and location of delivery); processing technology (type of technology, capacity and regionalization); products and markets (type of products and direction of distribution); and material flows (raw material and semi-finished products, wood products) within distribution logistics. All these decisions are defined on a product-by-product basis and must reflect the specifics of each distribution-logistic issue.

### 3.1.2. Ecological Issues

Some of the main ecological problems associated with forest biomass are carbon balance, greenhouse gas emissions during processing, and the forest ecosystem [35–38]. One of the main factors playing an important role in the systematic increase in the use of woody biomass as a wood raw material and alternative energy feedstock is its potential to reduce the consumption of non-renewable materials and its environmental neutrality. The use of fossil raw materials (e.g., steel, oil, or coal) causes CO<sub>2</sub> emissions to be released into the atmosphere, leading to the greenhouse effect and climate change [37]. Forest biomass is considered a renewable and low-carbon resource (carbon neutral). Carbon is sequestered as trees grow [25]. Research confirms that carbon neutrality has the potential to reach the required level through the process of long-term silviculture when new stands reach harvestable size [38]. However, a full assessment of carbon reductions from forest biomass use should take into account carbon emissions resulting mainly from the use of fuels for harvesting, handling, and transporting forest and woody biomass, and its production and distribution. These parameters quantify the potential impact of biomass processing on climate change, the human habitat, ecosystem improvement, and the security of non-renewable and renewable resources [39].

A critical ecological factor in scheduling the role of forest biomass is the maintenance of the forest ecosystem [40,41]. Silviculture secures the forest area's access to nutrients and maintains its fertility, thus maintaining a level of forest productivity [42]. The ecological issues of silviculture affect the forest's ability to retain water, determining the quality of soil and water. The forest area also provides shelter and food to various forest animals [43]. Therefore, uncontrolled forest biomass extraction may have negative effects, such as through reducing forest production, affecting flora and fauna that require wood, and increasing access to invasive species [44,45]. There are also potential positive effects of the intensive removal of wood biomass from forest areas, such as through limiting the spread of pests [44], reducing the risk of fires, and stabilizing biodiversity [26,44–46]. Therefore, it is important to develop rational strategies to mitigate the impact of removing woody substances from forest areas [47]. Proper design for developing wood and biomass processing plants should include CO<sub>2</sub> emission control, water security, waste management, and recycling processes to reduce emissions of pollutants into air, water, and soil. Using efficient technologies in the distribution logistics reduces the costs and amount of energy and fossil fuels needed to collect, process, and transport biomass.

The optimal location of processing plants has a positive effect. It is important to locate them close to significant sources of biomass (the share of wood products' processing plants in areas with significant forestation) and customer markets, which reduces the ecological costs of transport [44]. Considering the impact of green distribution logistics choices is crucial to maximizing business and ecological benefits.

### 3.1.3. Social Issues

Introducing new projects regarding processing forest biomass and wood raw materials may have many positive social effects. These may include changes in sources of potential

jobs, affecting people's livelihoods. The processes of pre-production of raw wood materials may influence changes in culture, communities, and political systems, as well as in the environment at the business level, and even change uncertainty based on the fears and aspirations of social groups [48].

However, many parameters cannot be consistently expressed in quantitative information. The social impacts most often considered in the optimization of forest- and wood-biomass-distribution logistics, which are defined quantitatively, are the direct generation of jobs and, thus, the creation of income. The number and quality of the jobs generated depends on strategic decisions in planning the best logistics for biomass redistribution. More significant investments in deep processing in the timber industry generate more jobs. It is necessary to analyze in-depth and demonstrate whether the number of jobs created as the result of processing a unit of biomass tends to increase as benefits are realized in the process scale-up model, through more efficient logistics and production systems [26].

In addition to creating more jobs, the development of wood and forest biomass-related enterprises generates income and job opportunities mainly for rural communities [49], improving the well-being of local people. Existing research on the impact of the development of distribution logistics on the social aspect should include how income affects the development of communities. Moreover, the biomass distribution logistics must consider the impact on other communities. These are elements related to the proximity of plants to urban areas, areas under protection, ecological areas, and regions [50,51].

### 3.2. Assessing Forest-Biomass-Distribution Logistics

Decision-making units need to select allowable alternatives and evaluate their potential business performance and environmental and social impacts in order to make sensible decisions about the design and planning of forest- and wood-biomass-distribution logistics for production in wood plants or for energy purposes. Appraisal studies help evaluate or predict project performance from different perspectives. Most researchers evaluating a distribution logistics problem consider a single evaluation factor using business or ecological assessment tools.

#### 3.2.1. Business Evaluations

In the literature on the business evaluation of forest-biomass-distribution logistics, technological and business studies are used to evaluate the business of various projects and choices of technological solutions. Technological and business research aims to assess the cost feasibility of processes for using wood biomass to produce a specific type of energy product [38–40] or wood product [52–57]. Business evaluation involves comparing the use of different raw materials [58–61], pre-processing technologies [62,63], product manufacturing [29,64–66], plant locations [67–69], or alternative products [70–73] in supply chain configuration. The most frequent business indicators in this group of studies were the obtained manufacturing cost ratios and the internal rate of return of the adopted technology.

Technology and business assessments are needed to examine the technological viability and business capacity of the proposed projects and to provide business comparisons between forest- and wood-biomass-distribution logistics. These analyses justify making or abandoning capital investments and help make decisions regarding the selection of the optimal distribution logistics.

However, technology and business studies need to determine the optimal choice of forest-biomass-distribution-logistics projects to obtain valid modeling results. Technological and business assessments for forest and wood products are based on purchasing and logistics data (transportation costs of raw materials). They often overlook important elements of forest-biomass-distribution logistics, including the fragmentation of forest biomass sources, variability in feedstock acquisition characteristics, and changes in production modalities (energy prices, yields, etc.).

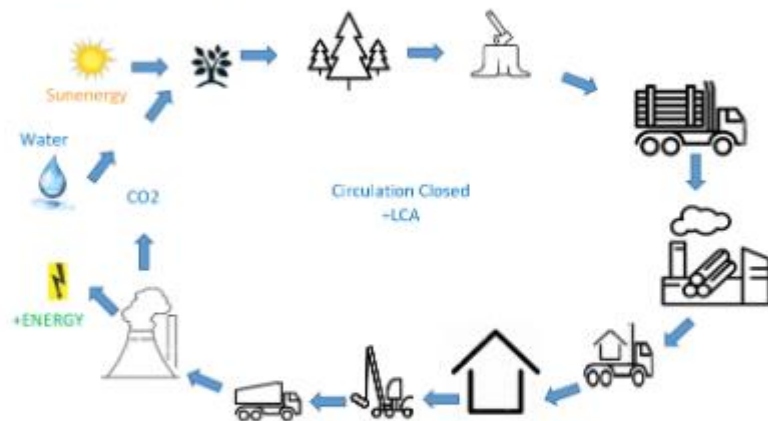
### 3.2.2. Ecological Assessments

Life cycle assessment (LCA) is a mainstream tool for evaluating the ecological effects of products. LCA is a method for systematically assessing the ecological burden and potential environmental impact of a product, process, or service by sourcing raw materials for disposal [74–76]. The rules and guidelines for LCA testing in Europe are reported in ISO/EN 14040 [77].

Based on the adopted European standards, LCA testing covers the stages [78] of its intended scope of application, limitations, and assumptions defining the functional unit that is the basis for comparison, summation of data related to material inputs, energy inputs, product-related waste, categorization of the product's potential ecological impact availability of nature's assets and impact on the healthiness of society, review and analysis of calculations, and the interpretation of results. In some studies, LCA quantifies the ecological importance of forest and woody biomass in a specific application [79–86] or compares alternative distribution logistics configurations or biomass utilization strategies [87]. Comparisons have been made between the ecological efficiency of using different forms of forest and woody biomass as sources of construction raw material or [88–95] combined heat and power (CHP) [52,96–98], and in solid fuel production [99], while other studies have compared different types and dimensions of technology for producing products or bioenergy [100–103].

Researchers [104–107] have evaluated various forms of forest and woody biomass and their processing alternatives, which have ecological impacts in the form of greenhouse gas issues, waste, human toxicity, and fossil-energy consumption.

Based on current knowledge, different LCA test results should not be used to compare the ecological declarations of tested products. LCA results depend on methodological choices, i.e., scoping, impact-assessment methods, allocation procedures, reference systems, and parameters related to local conditions [108,109]. Nevertheless, the LCA results obtained in modeling are effective in assessing and proposing ecological compromises at subsequent stages of the product life cycle using wood raw material or various forms of wood biomass. Transferring ecological LCA results into distribution logistics design should be avoided. LCA results can help compare ecological impacts for alternative woody biomass distribution logistics configurations, provided they are assessed using comparable modeling assumptions (Figure 1).



**Figure 1.** LCA product life cycle in closed loop using wood construction as an example—closed circuit; CO<sub>2</sub> + water + solar energy—forest—acquisition—transportation—treatment—construction—utilization—demolition—recycling—burning—energy + CO<sub>2</sub> + water.

In LCA studies, it is essential to take into account the sequestration of CO<sub>2</sub> by forests and wood during use. Standard LCA study do not take into account all elements of the impact of obtaining forest and woody biomass on the protection of soil, water, and biodiversity, which significantly affect the environment [109,110].

### 3.2.3. Social and Multivariate Assessments

The indicators currently used to evaluate the logistics of wood-biomass distribution are related to market sensitivity factors [23,111] and socio-business and ecological impacts. The rational use of wood resources and wood products can affect jobs, CO<sub>2</sub> emissions, and contributions to energy security. Researchers [112] have proposed an evaluation of sustainability impacts in forest distribution logistics using three indicators: production costs, employment, and emissions [113,114]. The indexes considered are production costs, asset/material consumption, total heat input at the use level, employment, wages and salaries, safety and public health, transportation of greenhouse gas emissions, energy consumption, soil quality, and carbon storage in felled biomass.

Methods for assessing social issues related to woody biomass distribution logistics have not yet been formulated. New methods must identify the effects of new designs on human health and the well-being of populations and ecosystems.

Business and ecological and social assessment tools help to analyze and compare forest-biomass-distribution logistics. They cannot, however, recommend an optimal design for forest-biomass-distribution logistics, given the complexity of the choices. This task can be accomplished through mathematical programming or optimization [115,116].

### 3.3. Optimization of Forest-Biomass-Distribution Logistics

Optimization of distribution logistics usually includes a goal function in the form of an equation, which is a mathematical solution of decision variables and other parameters.

In references, many optimization research studies have centered on decision support in the design, management, and monitoring of forest- and wood-biomass-distribution logistics. Most of them considered the business objective function. Optimization efforts for many of the targets included business outcomes, environmental impacts and indicators of forest-biomass-distribution-logistics optimization studies [117–121] (Figure 2).

#### 3.3.1. Business Optimization

Business-optimization models have been created to improve strategic and tactical planning decisions in forest- and wood-biomass-distribution logistics. The strategic models are designed to take into account long-term planning decisions and enable decision making under high levels of uncertainty. Most problems are formulated to minimize the total cost of distribution logistics and, to a smaller scale, to maximize yield at various stages of distribution logistics [7,44,49].

The optimization model can be applied to various solutions of adopted distribution logistics when the basic assumptions are equivalent. The development of LCA algorithms under development and advances in computational software [75,76] make it possible to consider an increasing number of decision variables and provide optimal solutions for the defined business-optimization objective function [122–125].

In the references reviewed to date, most of the research has focused on strategic decision making to support investment allocation and policy in the forestry, timber, or energy sectors. The dominant trend is to adopt optimization methods for logistics, production, and distribution planning and for product-life-cycle scheduling [41,117,118,126–128].

The optimization models used integrate the various stages of the distribution logistics and take into account separated forest- and wood-biomass products. Only some distribution logistics optimization models assume no conflict of interest among distribution logistics participants. This can be the case for large businesses. However, in practice, each distribution logistics participant may have different priorities and make different assumptions that are optimal for their position in wood-biomass-distribution logistics. Each

seeks to optimize its performance. Optimization of forest biomass' and wood products' distribution logistics results from the negotiation processes between independent actors in the chain under study. This area still needs to be recognized in distribution logistics research [127–137].

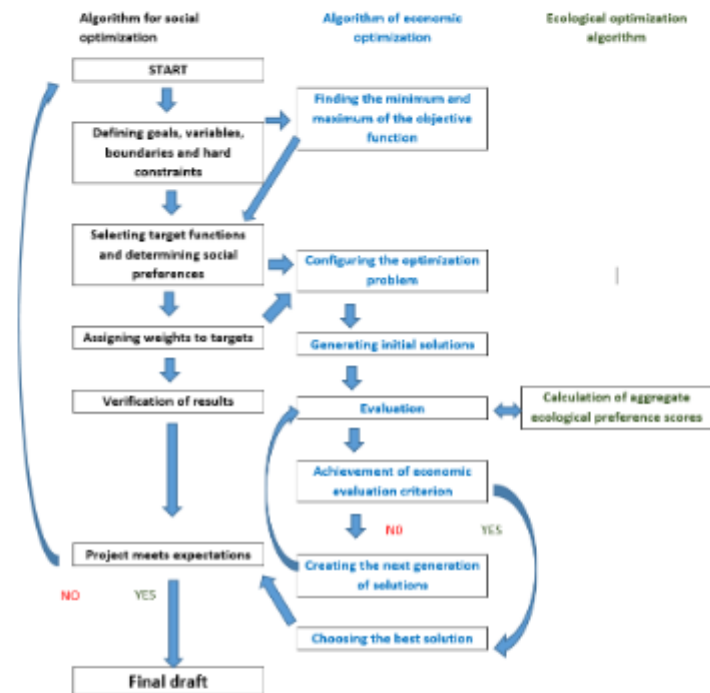


Figure 2. Schematic of the algorithm for multi-stakeholder optimization: business, ecological, and social.

### 3.3.2. Business, Ecological, and Social Optimization

Integrating business, social, and ecological objectives to optimize forest-biomass-distribution logistics is the subject of few investigations using a multi-stakeholder optimization approach [129–133,138–144].

### 3.3.3. Business, Ecological, and Social Optimization

Integrating business, social, and ecological objectives for optimizing forest- and wood-biomass-distribution logistics is the subject of few studies using a multi-objective optimization approach. In research, this optimization helps to make choices characterized by multiple parameters, often with incommensurable and conflicting objectives [145–147]. In multi-objective optimization, usually, only one optimal solution combines all objectives. A set of optimal solutions is developed for the correct model [148]. An optimal solution is one in which one objective cannot be improved without sacrificing another.

Incorporating LCA into multi-objective optimization to optimize a modeling system [148] has been used mainly in process systems' engineering [149]. The proposed combination of these methods for decision support in forest- and wood-biomass-distribution logistics is a relatively new field of studies. To the best of the contributors' expertise, there are few studies on these optimizations involving the use of forest and woody biomass [150–155] for multi-stakeholder optimization.

The application of multi-stakeholder methods in designing forest- and woody-biomass-distribution logistics for producing biofuels and wood products approximates real-world conditions by simultaneously considering many important elements in the decision-making procedure. Ensuring consistency in formulating different objectives is a significant challenge in optimizing the decision-making process. For example, when combining LCA and multi-stakeholder models in the planning of forest-biomass-distribution logistics for wood processing, it is important to decide whether to consider the ecological impacts associated with forest cultivation, wood production, product manufacturing and use, and waste disposal (ash, low-quality wood, and non-timber waste) to reduce or avoid CO<sub>2</sub> emissions and substitute non-renewable fuels. Parameters outside the scope of the business analysis of forest-biomass-distribution logistics can have a significant impact on the environment [156–158].

#### 4. Discussion

It is imperative to address the interplay between business, ecological, and social considerations within distribution-logistics decisions to ensure the sustainable use of wood and forest biomass for producing wood products and bioenergy. This research has undertaken an assessment and optimization of the planning and handling of distribution logistics involving forest biomass, focusing on its use in wood products and energy, all within the principles of sustainable development. Most of the ongoing life-cycle-assessment studies that pertain to forest biomass and wood products within the distribution logistics predominantly emphasize business and ecological requisites. Technological and business assessments have proven valuable in offering insights into the feasibility of biomass utilization under varying market conditions. They have also played a pivotal role in appraising the business viability of various woody-biomass projects and comparing the business case for various distribution-logistics alternatives. However, it is important to note that they need to offer a comprehensive solution for devising an optimal distribution-logistics configuration [159,160].

Lumber flow studies can assess a broad spectrum of ecological burdens and impacts throughout a product's life cycle. In many cases, LCA results do not definitively confirm the ecological superiority of one option for processing biomass or wood products over another form. Nevertheless, ongoing sensibility studies significantly raise ecological awareness and recognize trade-offs between alternatives. In order to conduct a comprehensive ecological assessment of the use of biomass and wood products, it is necessary to consider the effects on the overall health of forest ecosystems, as well as soil, water, and biological diversity, and the wood-processing environment. However, work is underway to develop indicators and methods for this purpose [150,153,160].

Research efforts to assess the effects of biomass-distribution logistics on sustainability in the forestry and timber industry often fail to analyze potential trade-offs among the various factors that interact with them. Optimization modeling research plays an essential role in defining the most appropriate configuration for applied forest-biomass-distribution logistics, especially when there are multiple options at various stages and levels of capacity planning. Such optimization requires the use of effective tools to assess available timber resources. While previous LCA studies have focused primarily on business decisions, tactical decisions must be based on practical solutions that are compatible with civilization requirements [107,108,161,162]. These practical solutions should consider business, ecological, and social factors to ensure the sustainability of new business proposals related to woody biomass.

Optimization studies that combine ecological business and social modeling of woody-biomass-distribution logistics integrate LCA assessment with optimization for stakeholders of producers and consumers of biomass products. They effectively combine various sustainability criteria to design woody-biomass-distribution logistics. This approach ensures credible sustainability trade-offs and consistently achieves expected societal goals. The main drivers of wood-biomass production are closely related to their potential to generate

business benefits and contribute to achieving energy and material independence. There is an ongoing need for further research to fully model the impact of selecting woody-biomass utilization systems. In addition, it is essential to develop decision-support methods that take into account ecological considerations, including their effects on the CO<sub>2</sub> balance of forest biomass, biodiversity, forest resistance, and social aspects, such as social and business security, in planning and scheduling the logistics of forest-biomass distribution. Sustainable-development strategies should meet social requirements and support biodiversity and social goals, economic growth, business models, job creation or technological development, and energy security. To achieve this, the implementation of new analytical tools to facilitate the management of forest and timber resources should be pursued. The direction is to expand efforts to fulfill the requirements of balancing an economic decision by creating ecological impact classifications within a socially acceptable range with strict balance control for the decision areas under study.

Today's energy-security requirements and public awareness necessitate actions where forests will simultaneously perform multiple functions in a sustainable manner. Reliable and comprehensive recognition of the tasks fulfilled by forest and timber resources securing ecosystem characteristics makes it possible to determine the intensity and type of use or exclusion of timber resources that will threaten the sustainability of a given social system and ecosystem. Therefore, the work on the classification of impact factors and the development of a model for separating from the group of potential energy resources makes it possible to preserve the functionality of the provision of services by forest ecosystems and, at the same time, secure the energy-security needs of countries. The defined structure of the diversity of the weight of the factors and the aspect of the economic use of the forest and its timber resources will form the basis for planning and conducting qualification from the economic energy use with sustainable management.

The overarching goal of the work, therefore, is to identify and estimate the potential of different types of resources to provide key energy services, identify the benefits and social costs for reducing and separating at a modeled size selected types of wood resources with defined potential to provide multiple services including economic ones. Thus, it will be a systematic link between the energy services of forest resources and the economic by-product resource of wood processing.

## 5. Conclusions

Forest and wood biomass potentially reduce materials that generate ecological costs. The optimization of product-life-cycle decisions must be taken into account in scheduling the distribution logistics of forest biomass and wood products, and the integration of the assessment of sustainability factors must be implemented to ensure benefits to society.

The use of multi-stakeholder optimization to optimize the modeling system takes into account business, social, and ecological factors in the wood-biomass-distribution logistics and wood-products-production elements, including elements of evaluation and optimization of the decision-making process.

So far, most research has focused on achieving business impact. The business and ecological performance of various forest-biomass-distribution logistics is defined through techno-business assessments and consideration of LCA assessment. Business optimization is widely used to help design forest-biomass-distribution logistics. Policy-decision support wheels quantify and optimize business, ecological, and social aspects of forest-biomass-distribution logistics, which can include tools such as life cycle evaluation to quantify sustainability effects on forestry and timber.

Balancing the economic decision, ecological impact, and social acceptance in the context of forest renewable energy is a complex task that requires the consideration of many factors.

1. "Economic considerations": Investment and operating costs must be considered, as well as potential financial benefits. Incorporating forest renewable energy into the economy can benefit job creation and increase the sustainability of local communities.

2. “Environmental impact”: Renewable energy sources, such as forest-based energy, can help reduce greenhouse gas emissions. However, the impact on local ecosystems needs to be carefully analyzed, especially in the context of tree cutting, its rate, and the potential for forest regeneration.
3. “Social acceptance”: This aspect requires engaging and educating local communities and understanding their concerns and needs. It is important that communities understand the benefits of forest renewable energy and are involved in the decision-making process.
4. “Policy and regulatory integration”: Effective policy and regulation can help balance different interests and encourage investment in sustainable energy sources.
5. “Innovation and technology”: Developing renewable energy technologies can help increase efficiency and reduce the environmental impact.
6. “Long-term planning”: A long-term approach that takes into account climate change, the needs of future generations, and potential changes in the economic environment is important for achieving a sustainable balance.

In practice, reaching a compromise requires dialogue among various stakeholders, including governments, businesses, scientists, environmental organizations, and local communities. It is important that the decision-making process is transparent, based on solid scientific data, and takes diverse perspectives into account.

**Author Contributions:** Conceptualization, Z.S.; methodology, Z.S.; software, M.W.; validation, M.W. and A.Z.; formal analysis, Z.S. and M.W.; investigation, M.W.; resources, Z.S.; data curation, A.Z. and K.A.; writing—original draft preparation, Z.S. and M.W.; writing—review and editing, Z.S., M.W., A.Z. and K.A.; visualization, M.W. and Z.S.; supervision, K.A.; project administration, Z.S.; funding acquisition, Z.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** All data generated or used during the study appear in the submitted article.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. He, J.; Liu, Y.; Lin, B. Should China support the development of biomass power generation? *Energy* **2018**, *163*, 16–425. [CrossRef]
2. Zhai, J.; Burke, I.T.; Stewart, D.I. Beneficial management of biomass combustion ashes. *Renewable and Sustainable Energy Rev.* **2021**, *151*, 111555. [CrossRef]
3. IEA Bioenergy. Potential Contribution of Bioenergy to the World’s Future Energy Demand. 2007. Available online: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Potential-Contribution-of-Bioenergy-to-the-Worlds-Future-Energy-Demand.pdf> (accessed on 15 October 2023).
4. Suttles, S.A.; Tyner, W.E.; Shively, G.; Sands, R.D.; Sohngen, B. Business effects of bioenergy policy in the United States and Europe: A general equilibrium approach focusing on forest biomass. *Renew. Energy* **2014**, *69*, 428–436. [CrossRef]
5. Buchholz, T.; Mason, T.; Springsteen, B.; Gunn, J.; Saah, D. Carbon Life Cycle Assessment on California-Specific Wood Products Industries: Do Data Backup General Default Values for Wood Harvest and Processing? *Forests* **2021**, *12*, 177. [CrossRef]
6. Wieruszewski, M.; Mydlarz, K. The Potential of the Bioenergy Market in the European Union—An Overview of Energy Biomass Resources. *Energies* **2022**, *15*, 9601. [CrossRef]
7. Barrette, J.; Paré, D.; Manka, F.; Guindon, L.; Bernier, P.; Titus, B. Forecasting the spatial distribution of logging residues in Canada’s managed forests. *Can. J. For. Res.* **2018**, *48*, 1470–1481. [CrossRef]
8. Tomczak, K.; Latterini, F.; Smarul, N.; Stanula, Z.; Jelonek, T.; Kuźmiński, R.; Łakomy, P.; Tomczak, A. Moisture Content of Fresh Scots Pine Wood in Areas near Damage Caused by Harvester Head Feed Rollers. *Forests* **2023**, *14*, 1276. [CrossRef]
9. Sánchez Lopez, J.; Curt, M.D.; Robert, N.; Fernández, J. Biomass Resources. *Role Bioenergy Bioeconomy* **2019**, 25–111. [CrossRef]
10. Paluš, H.; Parobek, J.; Moravčík, M.; Kovalčík, M.; Džian, M.; Murgaš, V. Projecting Climate Change Potential of Harvested Wood Products under Different Scenarios of Wood Production and Utilization: Study of Slovakia. *Sustainability* **2020**, *12*, 2510. [CrossRef]
11. Eliasson, L.; Eriksson, A.; Mohtashami, S. Analysis of factors affecting productivity and costs for a high-performance chip supply system. *Appl. Energy* **2017**, *185*, 497–505. [CrossRef]
12. Stanula, Z.; Wieruszewski, M.; Mydlarz, K.; Adamowicz, K. Fuel use reduction and business savings from optimization of road transportation of coniferous roundwood. *Energies* **2023**, *16*, 5334. [CrossRef]

13. Rentizelas, A.A.; Tolis, A.I.; Tatsiopoulos, I.P. Combined Municipal Solid Waste and biomass system optimization for district energy applications. *Waste Manag.* **2014**, *34*, 36–48. [CrossRef] [PubMed]
14. Gold, S.; Seuring, S. Distribution logistics and logistics issues of bio-energy production. *J. Clean. Prod.* **2011**, *19*, 32–42. [CrossRef]
15. Agustina, F.; Vanany, I.; Siswanto, N. Biomass Distribution logistics Design, Scheduling and Management: A Review of Literature. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Bangkok, Thailand, 16–19 December 2018; Volume 5, pp. 884–888. [CrossRef]
16. Castro, D.M.; Parreiras, F.S. A review on multi-criteria decision-making for energy efficiency in automotive engineering. *Appl. Comput. Inform.* **2018**, *17*, 1016. [CrossRef]
17. Ba, B.H.; Prins, C.; Prodhon, C. Models for optimization and performance evaluation of biomass distribution logistics: An Operations Research perspective. *Renew. Energy* **2016**, *87*, 977–989. [CrossRef]
18. Cambero, C.; Sowlati, T. Assessment and optimization of forest biomass distribution logistics from business, social and ecological perspectives—A review of literature. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *36*, 62–73. [CrossRef]
19. Yue, D.; You, F.; Snyder, S.W. Biomass-to-bioenergy and biofuel distribution logistics optimization: Overview, key issues and challenges. *Comput. Chem. Eng.* **2013**, *66*, 36–56. [CrossRef]
20. Gital Durmaz, Y.; Bilgen, B. Multi-objective optimization of sustainable biomass distribution logistics network design. *Appl. Energy* **2020**, *272*, 115259. [CrossRef]
21. De Meyer, A.; Cattrysse, D.; Kasinmäki, J.; Van Orshoven, J. Methods to optimize the design and management of biomass-for-bioenergy distribution logistics: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *31*, 657–670. [CrossRef]
22. Stupak, I.; Lattimore, B.; Titus, B.D.; Tattersall Smith, C. Criteria and indicators for sustainable forest fuel production and harvesting: A review of current standards for sustainable forest management. *Biomass Bioenergy* **2011**, *35*, 3287–3308. [CrossRef]
23. Mydlarz, K.; Wieruszewski, M. Problems of sustainable transport of large-sized roundwood. *Sustainability* **2020**, *12*, 2038. [CrossRef]
24. Zeng, Y.; Cai, Y.; Huang, G.; Dai, J. A Review on Optimization Modeling of Energy Systems Scheduling and GHG Emission Mitigation under Uncertainty. *Energies* **2011**, *4*, 1624–1656. [CrossRef]
25. Jeong, J.S. Biomass Feedstock and Climate Change in Agroforestry Systems: Participatory Location and Integration Scenario Analysis of Biomass Power Facilities. *Energies* **2018**, *11*, 1404. [CrossRef]
26. Camia, A.; Giuntoli, J.; Jonsson, K.; Robert, N.; Cazzaniga, N.; Jasinevičius, G.; Avitabile, V.; Grassi, G.; Barredo Cano, J.L.; Mubareka, S. *The Use of Woody Biomass for Energy Production in the EU*; Report number: JRC122719; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2021. [CrossRef]
27. Yu, D.; Zhang, C.; Wang, S.; Zhang, L. Evolutionary Game and Simulation Analysis of Power Plant and Government Behavior Strategies in the Coupled Power Generation Industry of Agricultural and Forestry Biomass and Coal. *Energies* **2023**, *16*, 1553. [CrossRef]
28. Jafri, Y.; Wetterlund, E.; Anheden, M.; Kulander, I.; Håkansson, Å.; Furusjö, E. Multi-aspect evaluation of integrated forest-based biofuel production pathways: Part 2. business, GHG emissions, technology maturity and production potentials. *Energy* **2019**, *172*, 1312–1328. [CrossRef]
29. Tunå, P.; Hultberg, C. Woody biomass-based transportation fuels—A comparative techno-business study. *Fuel* **2014**, *117*, 1020–1026. [CrossRef]
30. Ben-Iwo, J.; Manovic, V.; Longhurst, P. Biomass resources and biofuels potential for the production of transportation fuels in Nigeria. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *63*, 172–192. [CrossRef]
31. Pena, N.; Sheehan, J. Biofuels for Transportation: A Joint Initiative of BEA International and the Climate Business Network. *CDM Invest. NewsL.* **2007**, *3*, 3–10. Available online: <https://www.c2es.org/docUploads/Pena-CBNet.pdf> (accessed on 15 October 2023).
32. Lerma-Arce, V.; Oliver-Villanueva, J.V.; Segura-Orenga, G. Influence of raw material composition of Mediterranean pinewood on pellet quality. *Biomass Bioenergy* **2017**, *99*, 90–96. [CrossRef]
33. Coady, J.; Duquette, J. Quantifying the impacts of biomass driven combined heat and power grids in northern rural and remote communities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, *148*, 111296. [CrossRef]
34. Parthasarathy, P.; Narayanan, K.S. Hydrogen production from steam gasification of biomass: Influence of process parameters on hydrogen yield—A review. *Renew. Energy* **2014**, *66*, 570–579. [CrossRef]
35. Górna, A.; Wieruszewski, M.; Szabelska-Beręsewicz, A.; Stanula, Z.; Adamowicz, K. Biomass price prediction based on the example of Poland. *Forests* **2022**, *13*, 2179. [CrossRef]
36. Wieruszewski, M.; Górna, A.; Stanula, Z.; Adamowicz, K. Energy use of woody biomass in Poland: Its resources and harvesting form. *Energies* **2022**, *15*, 6812. [CrossRef]
37. Iribarren, D.; Susmozas, A.; Petrakopoulou, F.; Dufour, J. Ecological and exergetic evaluation of hydrogen production via lignocellulosic biomass gasification. *J. Clean. Prod.* **2014**, *69*, 165–175. [CrossRef]
38. Nikodinoska, N.; Buonocore, E.; Paletto, A.; Franzese, P.P. Wood-based bioenergy value chain in mountain urban districts: An integrated ecological accounting framework. *Appl. Energy* **2017**, *186*, 197–210. [CrossRef]
39. Cherubini, F.; Bird, N.D.; Cowie, A.; Jungmeier, G.; Schlamadinger, B.; Woess-Gallasch, S. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. *Resour. Conserv. Recycl.* **2009**, *53*, 434–447. [CrossRef]
40. Petrović, B.; Zhang, X.; Eriksson, O.; Wallhagen, M. Life Cycle Cost Analysis of a Single-Family House in Sweden. *Buildings* **2021**, *11*, 215. [CrossRef]

41. Hu, X.; He, Y.; Gao, L.; Umer, M.; Guo, Y.; Tan, Q.; Kang, L.; Fang, Z.; Shen, K.; Xia, T. Strategy Trade-Off of Predominant Stress Tolerance Relative to Competition and Reproduction Associated with Plant Functional Traits under Karst Forests. *Forests* **2023**, *14*, 1258. [\[CrossRef\]](#)
42. Western, J.M.; Cheng, A.S.; Anderson, N.M.; Motley, P. Examining the Social Acceptability of Forest Biomass Harvesting and Utilization from Collaborative Forest Landscape Restoration: A Case Study from Western Colorado, USA. *J. For.* **2017**, *115*, 530–539. [\[CrossRef\]](#)
43. Egnell, G. Effects of slash and stump harvesting after final felling on stand and site productivity in Scots pine and Norway spruce. *For. Ecol. Manag.* **2016**, *371*, 42–49. [\[CrossRef\]](#)
44. Akhtari, S.; Sowlati, T.; Day, K. Business feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *33*, 117–127. [\[CrossRef\]](#)
45. Coakley, S.; Petti, C. Impacts of the Invasive *Impatiens glandulifera*: Lessons Learned from One of Europe’s Top Invasive Species. *Biology* **2021**, *10*, 619. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
46. Silvestro, R.; Saulino, L.; Cavallo, C.; Allevalo, E.; Pindozi, S.; Cervelli, E.; Conti, P.; Mazzoleni, S.; Saracino, A. The Footprint of Wildfires on Mediterranean Forest Ecosystem Services in Vesuvius National Park. *Fire* **2021**, *4*, 95. [\[CrossRef\]](#)
47. Dufossé, K.; Marie-Charlotte, M.; Augiseau, V.; Henrion, T.; Djelal, H. Quantification and Ecological Assessment of Wood Ash from Biomass Power Plants: Case Study of Brittany Region in France. *Sustainability* **2022**, *14*, 99. [\[CrossRef\]](#)
48. Vancday, F. International principles for social impact assessment. *Impact Assess. Proj. Apprais.* **2003**, *21*, 5–12. [\[CrossRef\]](#)
49. McKay, H. Ecological, business, social and political drivers for increasing use of woodfuel as a renewable resource in Britain. *Biomass Bioenergy* **2006**, *30*, 308–315. [\[CrossRef\]](#)
50. Schnorf, V.; Trutnevyte, E.; Bowman, G.; Burg, V. Biomass transport for energy: Cost, energy and CO<sub>2</sub> performance of forest wood and manure transport chains in Switzerland. *J. Clean. Prod.* **2021**, *293*, 125971. [\[CrossRef\]](#)
51. Perpiñá, C.; Alfonso, D.; Pérez-Navarro, A.; Peñalvo, E.; Vargas, C.; Cárdenas, R. Methodology based on geographic information systems for biomass logistics and transport optimisation. *Renew. Energy* **2009**, *34*, 555–565. [\[CrossRef\]](#)
52. Moskalik, T.; Gendek, A. Production of Chips from Logging Residues and Their Quality for Energy: A Review of European Literature. *Forests* **2019**, *10*, 262. [\[CrossRef\]](#)
53. Stolarski, J.; Wierzbicki, S.; Nitkiewicz, S.; Stolarski, M.J. Wood Chip Production Efficiency Depending on Chipper Type. *Energies* **2023**, *16*, 4894. [\[CrossRef\]](#)
54. Xu, J.; Chang, S.; Yuan, Z.; Jiang, Y.; Liu, S.; Li, W.; Ma, L. Regionalized Techno-Business Assessment and Policy Analysis for Biomass Molded Fuel in China. *Energies* **2015**, *8*, 13846–13863. [\[CrossRef\]](#)
55. Alizadeh, P.; Tabil, L.G.; Mupondwa, E.; Li, X.; Cree, D. Technobusiness Feasibility of Bioenergy Production from Wood Sawdust. *Energies* **2023**, *16*, 1914. [\[CrossRef\]](#)
56. De, S.; Assadi, M. Impact of cofiring biomass with coal in power plants—A techno-business assessment. *Biomass Bioenergy* **2009**, *33*, 283–293. [\[CrossRef\]](#)
57. Kazagic, A.; Music, M.; Smajevic, I.; Ademovic, A.; Redzic, E. Possibilities and Sustainability of “biomass for Power” Solutions in the Case of a Coal-Based Power Utility. *Clean Technol. Environ. Policy* **2016**, *18*, 1675–1683. [\[CrossRef\]](#)
58. Yu, Q.; Wang, Y.; Van Le, Q.; Yang, H.; Hosseinzadeh-Bandbafha, H.; Yang, Y.; Sonne, C.; Tabatabaei, M.; Lam, S.S.; Peng, W. An Overview on the Conversion of Forest Biomass into Bioenergy. *Front. Energy Res.* **2021**, *9*, 684234. [\[CrossRef\]](#)
59. Huang, H.; Ramaswamy, S.; Al-Dajani, W.; Tschirner, U.; Cairncross, R.A. Effect of biomass species and plant size on cellulosic ethanol: A comparative process and business analysis. *Biomass Bioenergy* **2009**, *33*, 234–246. [\[CrossRef\]](#)
60. Elias, M.; Dees, J.; Cabiyo, B.; Saks, P.; Sanchez, D.L. Financial Analysis of Innovative Wood Products and Carbon Finance to Support Forest Restoration in California. *For. Prod. J.* **2023**, *73*, 31–42. [\[CrossRef\]](#)
61. Cebrucean, D.; Cebrucean, V.; Ionel, I. Modeling and Evaluation of a Coal Power Plant with Biomass Cofiring and CO<sub>2</sub> Capture. In *Recent Advances in Carbon Capture and Storage*; Headquarters IntechOpen Limited 5 Princes Gate Court: London, UK, 2017. [\[CrossRef\]](#)
62. Luo, H.; Niedzwiecki, I.; Arora, A.; Mościcki, K.; Pawlak-Kruczek, H.; Krochmalny, K.; Baranowski, M.; Tiwari, M.; Sharma, A.; Sharma, T.; et al. Influence of Torrefaction and Pelletizing of Sawdust on the Design Parameters of a Fixed Bed Gasifier. *Energies* **2020**, *13*, 3018. [\[CrossRef\]](#)
63. Mohammed, I.Y.; Abakr, Y.A.; Mokaya, R. Integrated Biomass Thermochemical Conversion for Clean Energy Production: Process Design and Business Analysis. *J. Ecol. Chem. Eng.* **2019**, *7*, 103093. [\[CrossRef\]](#)
64. Rentizelas, A.A.; Tatsiopoulou, I.P.; Tolis, A. An optimization model for multi-biomass tri-generation energy supply. *Biomass Bioenergy* **2009**, *33*, 223–233. [\[CrossRef\]](#)
65. Roy, P.; Dias, G. Prospects for pyrolysis technologies in the bioenergy sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2009**, *77*, 59–69. [\[CrossRef\]](#)
66. Zhu, X.; Zhang, Y.; Wang, Z.; Pan, X. Comparison of China’s Biomass Combustion Power Generation with Different Installed Capacities. *Energies* **2022**, *15*, 1535. [\[CrossRef\]](#)
67. Kadam, K.; Wooley, R.; Aden, A.; Nguyen, Q.; Yancey, M.; Ferraro, F. Softwood forest thinnings as a biomass source for ethanol production: A feasibility study for California. *Biotechnol. Prog.* **2000**, *16*, 947–957. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

68. Zhang, X. *Optimization and Analytics of Decarbonized Forest and Biomass Distribution Logistics*; Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports; WVU Digital Publishing Institute: Morgantown, WV, USA, 2022; Volume 11434. Available online: <https://researchrepository.wvu.edu/etd/11434> (accessed on 15 October 2023).
69. Danon, G.; Furtula, M.; Mandić, M. Possibilities of implementation of CHP (combined heat and power) in the wood industry in Serbia. *Energy* **2013**, *48*, 169–176. [[CrossRef](#)]
70. Gallagher, T.V.; Kantavichai, R.; Teeter, L.D. An Business Analysis of Incorporating Biomass Thinning into Loblolly Pine Plantations in Alabama. *Open J. For.* **2017**, *7*, 172–187. [[CrossRef](#)]
71. Niquidet, K.; Stennes, B.; van Kooten, G.C. Bioenergy from Mountain Pine Beetle Timber and Forest Residuals: A Cost Analysis. *Can. J. Agric. Bus. Rev. Can. D'agroéconomie* **2012**, *60*, 195–210. [[CrossRef](#)]
72. Brown, D.; Rowe, A.; Wild, P. Techno-business comparisons of hydrogen and synthetic fuel production using forest residue feedstock. *Int. J. Hydrog. Energy* **2014**, *39*, 12551–12562. [[CrossRef](#)]
73. Abdelaziz, O.Y.; Hultberg, C.P. Physicochemical characterisation of technical lignins for their potential valorisation. *Waste and Biomass Valorization* **2017**, *8*, 859–869. [[CrossRef](#)]
74. Klöpffer, W.; Grahl, B. *Life Cycle Assessment (LCA)*; Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. 12: Weinheim, Germany, 2014. [[CrossRef](#)]
75. Chen, C.X.; Pierobon, F.; Ganguly, I. Life Cycle Assessment (LCA) of Cross-Laminated Timber (CLT) Produced in Western Washington: The Role of Logistics and Wood Species Mix. *Sustainability* **2019**, *11*, 1278. [[CrossRef](#)]
76. Hofmeister, T.B.; Kristjansdottir, T.; Time, B.; Wiberg, A.H. *Life Cycle GHG Emissions from a Wooden Load-Bearing Alternative for a ZEB Office Concept*; SINTEF Academic Press: Oslo, Norway, 2015.
77. *ISO 14040*; Ecological Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. International Organization for Standardization: Genève, Switzerland, 2006.
78. Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*; Springer International Publishing: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018. [[CrossRef](#)]
79. Sgarbossa, A.; Boschiero, M.; Pierobon, F.; Cavalli, R.; Zanetti, M. Comparative Life Cycle Assessment of Bioenergy Production from Different Wood Pellet Distribution logistics. *Forests* **2020**, *11*, 1127. [[CrossRef](#)]
80. Tabata, T.; Okuda, T. Life cycle assessment of woody biomass energy utilization: Case study in Gifu Prefecture, Japan. *Energy* **2012**, *45*, 944–951. [[CrossRef](#)]
81. Pokhrel, G.; Hongmei, G.; Gardner, D.J.; O'Neill, S. Life Cycle Assessment (LCA) of Wood Flour and Pellets for Manufacturing Wood-Plastic Composites (WPCs). *Recent Prog. Mater.* **2022**, *4*, 2385. [[CrossRef](#)]
82. Zhang, F.; Johnson, D.M.; Wang, J. Life-cycle energy and GHG emissions of forest biomass harvest and transport for biofuel production in Michigan. *Energies* **2015**, *8*, 3258–3271. [[CrossRef](#)]
83. Bahramian, M.; Yetilmeszooy, K. Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy Build.* **2020**, *219*, 109917. [[CrossRef](#)]
84. Zhong, Z.W.; Song, B.; Zaki, M.B.M. Life-cycle assessment of flash pyrolysis of wood waste. *J. Clean Prod.* **2010**, *18*, 1177–1183. [[CrossRef](#)]
85. Taskhiri, M.S.; Garbs, M.; Geldermann, J. Sustainable logistics network for wood flow considering cascade utilisation. *J. Clean. Prod.* **2016**, *110*, 25–39. [[CrossRef](#)]
86. Froese, R.E.; Shonnard, D.R.; Miller, C.A.; Koers, K.P.; Johnson, D.M. An evaluation of greenhouse gas mitigation options for coal-fired power plants in the US Great Lakes States. *Biomass Bioenergy* **2010**, *34*, 251–262. [[CrossRef](#)]
87. Mac Kinnon, M.A.; Brouwer, J.; Samuelsen, S. The role of natural gas and its infrastructure in mitigating greenhouse gas emissions, improving regional air quality, and renewable resource integration. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2018**, *64*, 62–92. [[CrossRef](#)]
88. Duczowska, A.; Kulińska, E.; Plutecki, Z.; Rut, J. Sustainable Agro-Biomass Market for Urban Heating Using Centralized District Heating System. *Energies* **2022**, *15*, 4268. [[CrossRef](#)]
89. Sreejith, C.C.; Muraleedharan, C.; Arun, P. Life cycle assessment of producer gas derived from coconut shell and its comparison with coal gas: An Indian perspective. *Int. J. Energy Ecol. Eng.* **2013**, *4*, 1–22. [[CrossRef](#)]
90. Ghafghazi, S.; Sowlati, T.; Sokhansanj, S.; Bi, X.; Melin, S. Life cycle assessment of base-load heat sources for district heating system options. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2011**, *16*, 212–223. [[CrossRef](#)]
91. Sathre, R.; González-García, S. Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. *Eco-Effic. Constr. Build. Mater.* **2014**, *51*, 311–337. [[CrossRef](#)]
92. Goryunov, A.G.; Goryunova, N.N.; Ogunlana, A.O.; Manenti, F. Production of energy from biomass: Near or distant future prospects? *Chem. Eng. Trans.* **2016**, *52*, 1219–1224. [[CrossRef](#)]
93. Pa Sadaghiani, S.; Mafakheri, F.; Chen, Z. Life Cycle Assessment of Bioenergy Production Using Wood Pellets: A Case Study of Remote Communities in Canada. *Energies* **2023**, *16*, 5697. [[CrossRef](#)]
94. Yu, Z.; Ma, H.; Liu, X.; Wang, M.; Wang, J. Review in life cycle assessment of biomass conversion through pyrolysis-issues and recommendations. *Green Chem. Eng.* **2022**, *3*, 304–312. [[CrossRef](#)]
95. Fan, J.; Kalnes, T.N.; Alward, M.; Klinger, J.; Sadehvandi, A.; Shonnard, D.R. Life cycle assessment of electricity generation using fast pyrolysis bio-oil. *Renew. Energy* **2011**, *36*, 632–641. [[CrossRef](#)]

96. Cambero, C.; Hans Alexandre, M.; Sowlati, T. Life cycle greenhouse gas analysis of bioenergy generation alternatives using forest and wood residues in remote locations: A case study in British Columbia, Canada. *Resour. Conserv. Recycl.* **2015**, *105*, 59–72. [\[CrossRef\]](#)
97. Eriksson, O.; Finnveden, G.; Ekvall, T.; Björklund, A. Life cycle assessment of fuels for district heating: A comparison of waste incineration, biomass- and natural gas combustion. *Energy Policy* **2007**, *35*, 1346–1362. [\[CrossRef\]](#)
98. Puettmann, M.E.; Lippke, B. Woody biomass substitution for thermal energy at softwood lumber mills in the US in land Northwest. *For. Prod. J.* **2012**, *62*, 273–279. [\[CrossRef\]](#)
99. Padilla-Rivera, A.; Barrette, J.; Blanchet, P.; Thiffault, E. Ecological Performance of Eastern Canadian Wood Pellets as Measured Through Life Cycle Assessment. *Forests* **2017**, *8*, 352. [\[CrossRef\]](#)
100. Barahmand, Z.; Eikeland, M.S. A Scoping Review on Ecological, Business, and Social Impacts of the Gasification Processes. *Environments* **2022**, *9*, 92. [\[CrossRef\]](#)
101. Abbas, D.; Handler, R.M. Life-cycle assessment of forest harvesting and transportation operations in Tennessee. *J. Clean. Prod.* **2018**, *176*, 512–520. [\[CrossRef\]](#)
102. Kalinci, Y.; Hepbasli, A.; Dincer, I. Life cycle assessment of hydrogen production from biomass gasification systems. *Int. J. Hydrog. Energy* **2012**, *37*, 14026–14039. [\[CrossRef\]](#)
103. Cespi, D.; Passarini, F.; Ciacci, L.; Vassura, I.; Castellani, V.; Collina, E.; Morselli, L. Heating systems LCA: Comparison of biomass-based appliances. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2013**, *19*, 89–99. [\[CrossRef\]](#)
104. Guest, G.; Bright, R.M.; Cherubini, F.; Michelsen, O.; Strømman, A.H. Life cycle assessment of biomass-based combined heat and power plants. *J. Ind. Ecol.* **2011**, *5*, 908–921. [\[CrossRef\]](#)
105. Petrovic, B.; Myhren, J.A.; Zhang, X.; Wallhagen, M.; Eriksson, O. Life cycle assessment of a wooden single-family house in Sweden. *Appl. Energy* **2019**, *251*, 113253. [\[CrossRef\]](#)
106. Dashtpeyma, M.; Ghodsi, R. Forest Biomass and Bioenergy Distribution logistics Resilience: A Systematic Literature Review on the Barriers and Enablers. *Sustainability* **2021**, *13*, 6964. [\[CrossRef\]](#)
107. Steubing, B.; Zah, R.; Ludwig, C. Life cycle assessment of SNG from wood for heating, electricity, and transportation. *Biomass Bioenergy* **2011**, *35*, 2950–2960. [\[CrossRef\]](#)
108. Cherubini, F.; Strømman, A.H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresour. Technol.* **2011**, *102*, 437–451. [\[CrossRef\]](#)
109. Bosner, A.; Porsinsky, T.; Stankic, I. Forestry and life cycle assessment. In *Global Perspectives on Sustainable Forest Management*; Okia, C., Ed.; InTech: Rijeka, Croatia, 2012; pp. 139–160. [\[CrossRef\]](#)
110. Titus, B.D.; Brown, K.; Helmisaari, H.S.; Vanguelova, E.; Stupak, I.; Evans, A.; Reece, P. Sustainable forest biomass: A review of current residue harvesting guidelines. *Energy Sustain. Soc.* **2021**, *11*, 1–32. [\[CrossRef\]](#)
111. Woo, H.; Acuna, M.; Cho, S.; Park, J. Assessment Techniques in Forest Biomass along the Timber Distribution logistics. *Forests* **2019**, *10*, 1018. [\[CrossRef\]](#)
112. Grünberg, J.; Ghaffariyan, M.R.; Jourholami, M.E.; Labelle, E.R.; Kaakkurivaara, N.; Renato Cesar Gonçalves, R.R.; Kühmaier, M. Criteria for Assessing the Sustainability of Logging Operations—A Systematic Review. *Curr. For. Rep.* **2023**, *9*, 350–369. [\[CrossRef\]](#)
113. Werhahn-Mees, W.; Palosuo, T.; Garcia-Gonzalo, J.; Röser, D.; Lindner, M. Sustainability impact assessment of increasing resource use intensity in forest bioenergy production chains. *Glob. Chang. Biol. Bioenergy* **2011**, *3*, 91–106. [\[CrossRef\]](#)
114. Karvonen, J.; Halder, P.; Kangas, J.; Leskinen, P. Indicators and tools for assessing sustainability impacts of the forest bioeconomy. *For. Ecosyst.* **2017**, *4*, 2. [\[CrossRef\]](#)
115. Min, S.; Zacharia, Z.G.; Smith, C.D. Defining Distribution logistics Management: In the Past, Present, and Future. *J. Bus. Logist.* **2019**, *40*, 44–55. [\[CrossRef\]](#)
116. Kamalakkannan, S.; Kulatunga, A.K. Optimization of eco-design decisions using a parametric life cycle assessment. *Sustain. Prod. Consum.* **2011**, *27*, 1297–1316. [\[CrossRef\]](#)
117. Kozuch, A.; Cywicka, D.; Adamowicz, K.; Wieruszewski, M.; Wysocka-Fijorek, E.; Kiełbasa, P. The Use of Forest Biomass for Energy Purposes in Selected European Countries. *Energies* **2023**, *16*, 5776. [\[CrossRef\]](#)
118. Koirala, A.; Kizha, A.R.; De Hoop, C.F.; Roth, B.E.; Han, H.-S.; Hiesl, P.; Abbas, D.; Gautam, S.; Baral, S.; Bick, S.; et al. Annotated Bibliography of the Global Literature on the Secondary Transportation of Raw and Comminuted Forest Products (2000–2015). *Forests* **2018**, *9*, 415. [\[CrossRef\]](#)
119. Akay, A.E.; Serin, H.; Sessions, J.; Bilici, E.; Pak, M. Evaluating the effects of improving forest road standards on business value of forest products. *Croat. J. For. Eng. J. Theory Appl. For. Eng.* **2021**, *42*, 245–258. [\[CrossRef\]](#)
120. Bollinger, L.A.; Marquant, J.; Sulzer, M. Optimization-based scheduling of local energy systems bridging the research-practice gap. In *IOP Conference Series: Earth and Ecological Science*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2019; Volume 323, p. 012077. [\[CrossRef\]](#)
121. Liu, Z.; Wang, S.; Ouyang, Y. Reliable Biomass Distribution logistics Design under Feedstock Seasonality and Probabilistic Facility Disruptions. *Energies* **2017**, *10*, 1895. [\[CrossRef\]](#)
122. Elia, J.A.; Baliban, R.C.; Xiao, X.; Floudas, C.A. Optimal energy supply network determination and life cycle analysis for hybrid coal, biomass, and natural gas to liquid (CBGTL) plants using carbon-based hydrogen production. *Comput. Chem. Eng.* **2011**, *35*, 1399–1430. [\[CrossRef\]](#)
123. Kim, J.; Realf, M.J.; Lee, J.H. Optimal design and global sensitivity analysis of biomass distribution logistics networks for biofuels under uncertainty. *Comput. Chem. Eng.* **2011**, *35*, 1738–1751. [\[CrossRef\]](#)

124. Batista, R.M.; Converti, A.; Pappalardo, J.; Benachour, M.; Sarubbo, L.A. Tools for Optimization of Biomass-to-Energy Conversion Processes. *Processes* **2023**, *11*, 854. [\[CrossRef\]](#)
125. Wieruszewski, M.; Turbański, W.; Mydlarz, K.; Sydor, M. Business Efficiency of Pine Wood Processing in Furniture Production. *Forests* **2023**, *14*, 688. [\[CrossRef\]](#)
126. Deka, T.J.; Osman, A.I.; Baruah, D.C.; Rooney, D.W. Methanol fuel production, utilization, and techno-economy: A review. *Environ. Chem. Lett.* **2022**, *20*, 3525–3554. [\[CrossRef\]](#)
127. Atashbar, N.Z.; Labadie, N.; Prins, C. Modeling and optimization of biomass distribution logistics: A review and a critical look. *IFAC-PapersOnLine* **2016**, *49*, 604–615. [\[CrossRef\]](#)
128. Safarian, S. Climate Impact Comparison of Biomass Combustion and Pyrolysis with Different Applications for Biochar Based on LCA. *Energies* **2023**, *16*, 5541. [\[CrossRef\]](#)
129. Yagi, K.; Nakata, T. Business analysis on small-scale forest biomass gasification considering geographical resources distribution and technological characteristics. *Biomass Bioenergy* **2011**, *35*, 2883–2892. [\[CrossRef\]](#)
130. Helal, M.A.; Anderson, N.; Wei, Y.; Thompson, M. A Review of Biomass-to-Bioenergy Distribution Logistics Research Using Bibliometric Analysis and Visualization. *Energies* **2023**, *16*, 1187. [\[CrossRef\]](#)
131. Campbell, R.M.; Anderson, N.M. Comprehensive comparative business evaluation of woody biomass energy from silvicultural fuel treatments. *J. Ecol. Manag.* **2019**, *250*, 109422. [\[CrossRef\]](#)
132. Ramage, M.H.; Burrige, H.; Busse-Wicher, M.; Fereday, G.; Reynolds, T.; Shah, D.U.; Scherman, O. The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *68*, 333–359. [\[CrossRef\]](#)
133. Piedra-Jimenez, F.; Tassin, N.G.; Novas, J.M.; Rodriguez, M.A. GDP-based approach for optimal design of forest biorefinery distribution logistics considering circularity and conversion facilities co-location. *Comput. Chem. Eng.* **2022**, *163*, 107834. [\[CrossRef\]](#)
134. Vesterlund, M.; Dahl, J.; Lindblom, B.; Sandberg, J. A new method for modeling district heating systems. In Proceedings of the International Conference on Applied Energy, Suzhou, China, 5–8 July 2012. Paper ID: ICAE2012-A10201.
135. Truong, N.L.; Gustavsson, L. Integrated biomass-based production of district heat, electricity, motor fuels and pellets of different scales. *Appl. Energy* **2013**, *104*, 623–632. [\[CrossRef\]](#)
136. Stec, S.; Szymańska, E.J.; Stec-Rusiecka, J.; Puacz-Olszewska, J. Transformation of the Polish Heating Sector Based on an Example of Select Heat Energy Companies Supplying Energy to Local Government Units. *Energies* **2023**, *16*, 7550. [\[CrossRef\]](#)
137. Kong, J.; Ronnqvist, M.; Frisk, M. Modeling an Integrated Market for Sawlogs, Pulpwood and Forest Bioenergy. *SSRN Electron. J.* **2011**, *42*, 1935884. [\[CrossRef\]](#)
138. Nurek, T.; Gendek, A.; Roman, K.; Dąbrowska, M. The Impact of Fractional Composition on the Mechanical Properties of Agglomerated Logging Residues. *Sustainability* **2020**, *12*, 6120. [\[CrossRef\]](#)
139. Sosa, A.; Acuna, M.; McDonnell, K.; Devlin, G. Managing the moisture content of wood biomass for the optimisation of Ireland's transport supply strategy to bioenergy markets and competing industries. *Energy* **2015**, *86*, 354–368. [\[CrossRef\]](#)
140. Malladi, K.T.; Sowlati, T. Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *94*, 587–599. [\[CrossRef\]](#)
141. Akhtari, S.; Sowlati, T.; Day, K. Optimal flow of regional forest biomass to a district heating system. *Int. J. Energy Res.* **2013**, *38*, 954–964. [\[CrossRef\]](#)
142. Ghaffariyan, M.R.; Acuna, M.; Brown, M. Analysing the effect of five operational factors on forest residue distribution logistics costs: A case study in Western Australia. *Biomass Bioenergy* **2013**, *59*, 486–493. [\[CrossRef\]](#)
143. Shabani, N.; Sowlati, T. A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant. *Appl. Energy* **2013**, *104*, 353–361. [\[CrossRef\]](#)
144. Bixby, R.E. Solving real-world linear programs: A decade and more of progress. *Oper. Res.* **2002**, *50*, 3–15. [\[CrossRef\]](#)
145. Berry, D.M. The essential similarity and differences between mathematical modeling and programming. *Sci. Comput. Program.* **2013**, *78*, 1208–1211. [\[CrossRef\]](#)
146. Ezquerro, M.; Pardos, M.; Diaz-Balteiro, I. Sustainability in Forest Management Revisited Using Multi-Criteria Decision-Making Techniques. *Sustainability* **2019**, *11*, 3645. [\[CrossRef\]](#)
147. Deb, K.; Deb, K. Multi-objective Optimization. *Search Methodol.* **2013**, *403*–449. [\[CrossRef\]](#)
148. Kucukvar, M.; Egilmez, G.; Tatari, O. Life Cycle Assessment and Optimization-Based Decision Analysis of Construction Waste Recycling for a LEED-Certified University Building. *Sustainability* **2016**, *8*, 89. [\[CrossRef\]](#)
149. Ewertowska, A.; Galán-Martín, A.; Guillén-Gosálbez, G.; Gavalda, J.; Jiménez, L. Assessment of the ecological efficiency of the electricity mix of the top European economies via data envelopment analysis. *J. Clean. Prod.* **2016**, *116*, 13–22. [\[CrossRef\]](#)
150. Abdul Razik, A.H.; Khor, C.S.; Elkamel, A. A model-based approach for biomass-to-bioproducts distribution logistics network scheduling optimization. *Food Bioprod. Process.* **2019**, *118*, 293–305. [\[CrossRef\]](#)
151. Yang, H.; Dou, X.; Pan, F.; Wu, Q.; Li, C.; Zhou, B.; Hao, L. Optimal scheduling of local biomass-based integrated energy system considering anaerobic co-digestion. *Appl. Energy* **2022**, *316*, 119075. [\[CrossRef\]](#)
152. Farajiamiri, M.; Meyer, J.C.; Walther, G. Multi-objective optimization of renewable fuel distribution logistics regarding cost, land use, and water use. *Appl. Energy* **2023**, *349*, 121652. [\[CrossRef\]](#)
153. Helo, P.; Rouzafzoon, J. An Agent-Based Simulation and Logistics Optimization Model for Managing Uncertain Demand in Forest Distribution logistics. *Distrib. Logist. Anal.* **2023**, *4*, 100042. [\[CrossRef\]](#)

154. Sacchelli, S.; Bernetti, I.; De Meo, I.; Fiori, L.; Paletto, A.; Zambelli, P.; Ciolli, M. Matching socio-business and ecological efficiency of wood-residues energy chain: A partial equilibrium model for a case study in Alpine area. *J. Clean Prod.* **2014**, *66*, 431–442. [[CrossRef](#)]
155. Pérez-Fortes, M.; Laínez-Aguirre, J.M.; Bojarski, A.D.; Puigjaner, L. Optimization of pre-treatment selection for the use of woody waste in co-combustion plants. *Chem. Eng. Res. Des.* **2014**, *92*, 1539–1562. [[CrossRef](#)]
156. Santos, A.; Carvalho, A.; Barbosa-Póvoa, A.P.; Marques, A.; Amorim, P. Assessment and optimization of sustainable forest wood distribution logistics—A systematic literature review. *For. Policy Bus.* **2019**, *105*, 112–135. [[CrossRef](#)]
157. Zhilyaev, D.; Binnekamp, R.; Wolfert, A.M.R. Best Fit for Common Purpose: A Multi-Stakeholder Design Optimization Methodology for Construction Management. *Buildings* **2022**, *12*, 527. [[CrossRef](#)]
158. Husgafvel, R.; Sakaguchi, D. Circular Economy Development in the Wood Construction Sector in Finland. *Sustainability* **2023**, *15*, 7871. [[CrossRef](#)]
159. Zengin, H.; Asan, U.; Destan, S.; Unal, M.E.; Yesil, A.; Betingger, P.; Degermenchi, A.S. Modeling Harvest Scheduling in Multifunctional Scheduling of Forest for Longterm Water Yield Optimization. *Nat. Resour. Model.* **2015**, *28*, 1111. [[CrossRef](#)]
160. Jørgensen, A.; Le Bocq, A.; Nazakina, L.; Hauschild, M.Z. Methodologies for social life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2008**, *13*, 96–103. [[CrossRef](#)]
161. Avelin, A.; Skvaril, J.; Aulin, R.; Odlare, M.; Dahlquist, E. Forest Biomass for Bioenergy production—Comparison of Different Forest Species. *Energy Procedia* **2014**, *61*, 1820–1823. [[CrossRef](#)]
162. Cabral, M.; Fonseca, T.F.; Cerveira, A. Optimization of Forest Management in Large Areas Arising from Grouping of Several Management Bodies: An Application in Northern Portugal. *Forests* **2022**, *13*, 471. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

3. **Stanula Z.**, Wieruszewski M., Mydlarz K., Adamowicz K. Fuel use reduction and economic savings from optimization of road transportation of coniferous roundwood. *Energies*. 2023, vol. 16 (issue 14), art. no. 5334; DOI: 10.3390/en16145334 (#3)

Article

# Fuel Use Reduction and Economic Savings from Optimization of Road Transportation of Coniferous Roundwood

Zygmunt Stanula <sup>1</sup>, Marek Wieruszewski <sup>2,\*</sup>, Katarzyna Mydlarz <sup>3</sup> and Krzysztof Adamowicz <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Forestry Economics and Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland; zygmunt.stanula@up.poznan.pl (Z.S.); krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl (K.A.)

<sup>2</sup> Department Mechanical Wood Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland

<sup>3</sup> Department of Law and Organization of Agribusiness Enterprises, Faculty of Economics, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland; katarzyna.mydlarz@up.poznan.pl

\* Correspondence: marek.wieruszewski@up.poznan.pl

**Abstract:** One of the 10 priorities of the Green New Deal is sustainable transportation. It should be considered in the perspective of long-term ecological and economic sustainability, according to the trend of opportunities for sustainable development. The economic and environmental aspects of transportation related to the harvesting and movement of timber play a special role in the energy cost and their environmental impact per distance of raw material supply. The principles of rational and energy-efficient use of transportation equipment play a key role in the movement of raw timber. These are influenced by the availability of timber resources, limitation of vehicle payloads, reduction of energy consumption expressed in terms of reduction of fuel combustion, or current legal and road regulations for timber transportation. The paper evaluates economic and environmental factors in relation to the demand for fuels necessary for the implementation of road transportation of softwood timber. The aim of this paper was to present the current situation of the use of transportation means in the movement of bulky timber, as well as opportunities to optimize fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions, affecting the economic and environmental effects. Previous studies on fuel consumption in the transportation of roundwood indicate irrational use of vehicles. This indicates unused payload capacity increasing energy inputs expressed in fuel consumption. It has been empirically investigated that this is the result of improperly approved transport sets adapted to the material being transported. In addition, it was shown that there is a clear correlation between the vehicle payload utilization rate and economic and environmental factors. The results of this study point to the potential to increase the use of transportation vehicles for timber transportation and reduce fuel combustion and CO<sub>2</sub> emissions by 7–20%.

**Keywords:** softwoods; timber transportation; transportation means; economics; environment



Citation: Stanula, Z.; Wieruszewski, M.; Mydlarz, K.; Adamowicz, K. Fuel Use Reduction and Economic Savings from Optimization of Road Transportation of Coniferous Roundwood. *Energies* 2023, 16, 5334. <https://doi.org/10.3390/en16145334>

Academic Editors: Devinder Mahajan and Albert Ratner

Received: 24 April 2023

Revised: 4 July 2023

Accepted: 11 July 2023

Published: 12 July 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Timber transportation is one of the elements of logistics management on which the efficiency of management in the forest and timber sector largely depends. Due to the current legal acts on transport policy and the provisions of highway code, it is necessary to achieve an optimum between environmental protection and economic aspects of transport. Modern forest-timber management, despite the fact that it is not directly regulated by EU legislation [1], significantly affects the fulfillment of environmental objectives [2]. The scope of sustainable management in timber harvesting and transport is presented in research manuscripts reporting large datasets that are deposited in various publicly available EU documents, including the “Green Paper on forest protection and information in the EU: preparing forests for climate change” and the European Parliament resolution of 28 April 2015 on “A new EU forestry strategy: for forests and the forest-based sector”

(2014/2223(INI)) [3,4], further developed through the introduction of new directives of 16 July 2021, “New EU Forest Strategy 2030” [5].

Timber transportation is an important issue in sustainable forest and timber management, which enforces taking measures to use forests in a way that preserves the biological structure and performs the economic functions of forests without harming other ecosystems [6]. According to the Polish PEFC PL 1003:2012 regulations, which correspond to EU directives, sustainable transport conditions must be met within forest management. This approach requires both preparation and adaptation of transport infrastructure, i.e., roads, transport routes, and bridges, which must be properly planned, built, and maintained to ensure an efficient transport system. At the same time, it is required to reduce the negative impact on the environment [7], among other things, through the decarbonization of transportation [8]. Actions taken in this regard are focused on the reduction and control of exhaust emissions and the promotion of transportation modes that use renewable energy sources as fuel [9]. Transportation issues related to timber management are important not only from the point of view of an efficient and economically viable supply of wood raw material, but also from the point of view of its impact on the environment. Timber transportation within the significantly varied availability of raw material targets both land and water deliveries. Land transport is among the most demanding and problematic transportation modes. In the group of raw material deliveries with higher value indices, road transport is dominantly preferred over rail transport for the delivery of wood paper and board raw material. This is due to the peculiarities of the transported wood sorts, especially when it comes to roundwood [10]. However, these issues are not regulated by any general regulations within the European Union. In this regard, any irregularities in the transportation of wood should be considered in light of the applicable internal regulations of the member countries [11]. In Poland, the guidelines for timber transportation and safety are contained in the Regulation of the Minister of Infrastructure dated 25 January 2018, which describes both the proper arrangement of the transported raw material and the related transport safety measures [12].

An important element in planning the transportation of timber by road is the maximum permissible gross vehicle weight (GVW) on roads. In Poland, these restrictions are defined by Article 61 § 15 of the Road Traffic Law, indicating a level of 40–42 Mg, depending on the form of vehicle combination (Polish national regulations). Taking into account the vehicle type and design, the maximum permissible volume of transported pine raw material is usually between 25 and 30 m<sup>3</sup> [13]. However, there are discrepancies with regard to the current legislation. They often result from the dead weight of vehicles limiting loading. The most frequently reported discrepancies involve exceeding the maximum permissible load weight [14]. Significant non-optimized underloading of transport cars is also common [15]. The reasons behind such irregularities include the varying density of timber, which depends on its type, form, and period of harvesting, which contributes to high variability in cargo weight [16–19]. In addition, the variability in timber moisture content at the point of initial loading prevents accurate determination of its weight. This often results in unknowing noncompliance with timber transportation regulations [12,20].

In European countries, there is a great deal of variability in the applicable restrictions on vehicle loading, which is due to varying permissible gross weights. Germany has a maximum permissible load weight at a level similar to that in Poland (40 Mg), with discussions underway to increase it to 44 Mg [21]. According to German business associations, such a level is already allowed in Belgium, Luxembourg, and the Czech Republic. In addition, other European countries have higher permissible gross weights for transport vehicles, such as 50 Mg in the Netherlands and 54 Mg in Denmark. In contrast, the maximum permissible gross vehicle weight in Scandinavian countries is about 60 Mg, and there are also ongoing discussions on its increase [21,22]. Such a wide variation in the levels of maximum permissible load weight and differences in the total weight of a combination of road vehicles means that discussions are underway on appropriate provisions for the permissible load capacity of vehicles. This is especially true given that exceeding the

permissible outage is associated with increased fuel consumption and exhaust emissions. Therefore, the research indicates the need to analyze issues related to the optimization of timber transportation.

Studies show that a reduction in CO<sub>2</sub> emissions in road transportation of up to 90% compared to 1990 can be achieved by 2050 through strong fleet choices. With strong fleet modification, and if all measures reach their best potency, the most common source of CO<sub>2</sub> emissions in wheeled transportation—the internal combustion engine—will be reduced. The magnitude of these emissions is equal to the quantity and quality of the fuel burned. Thus, the level of emissions can fall by reducing its consumption. Therefore, the article focuses on opportunities to reduce CO<sub>2</sub> from road transport by evaluating optimal vehicle loading. One of the main concepts for improving supply chains is cooperation between stakeholders by increasing the efficiency of the resources they share. In the literature, one can find research papers related to vertical cooperation in the logistics industry [23,24]. Such cooperation is possible thanks to databases that allow the optimal use of transportation resources and adapt them to the distance and type of product being transported.

Both the variability of regulations and the diversity of timber load preparation require the development of proposals for the possibility of increasing the cargo volume and adapting it to vehicle payloads. The aim of this study is to identify the factors responsible for the under- or oversizing of loads in the transportation of large-sized timber. As a result of the analysis, it is expedient to identify solutions that will determine the variability of cargo volume selection of the studied timber species, and which should be implemented in practice. This will have an impact on cost optimization in the context of economic and environmental aspects of road transport. As a result, it will be possible to indicate the rationale for taking measures to reduce transport cycles by optimizing vehicle filling and taking into account environmental aspects, both locally and globally.

## 2. Materials and Methods

The large-size timber supplies implemented in the western part of Poland were selected as the research area undertaken. It covered the entire year of 2022. The study focused on the supply of timber from 9 Regional Directorates of the State Forests, including 233 forest districts located in the indicated region of Central Europe. The research process was carried out by analyzing the road transport of pine (*Pinus sylvestris* L.) roundwood, which dominates the domestic market. The study used source materials on the transportation of timber with a volume of more than 1 million m<sup>3</sup>. The starting point for addressing the issue was the regulations in force in Poland that inform about the permissible maximum weight of raw timber transported from selected forest districts to timber industry customers. The use of digital tools and initiatives to support smart mobility can be a key aspect of developing smart transportation load reduction areas. Traffic reduction and loading restrictions, such as loading acceptable levels of kit preparation with multiples of 25 m<sup>3</sup> or 30 m<sup>3</sup>, determine the filling of trucks. The simulation deals with the evaluation of the impact of filling for cars in the range of 25 m<sup>3</sup> and 30 m<sup>3</sup> and the assumed intermediate theoretical loading of 27 m<sup>3</sup> averaged pine wood. It was assumed that the loading volume can have a positive impact on traffic situations, especially at high transport density.

The article attempts to find a general solution to the problem based on statistical research. To confirm the statistics, real transportation data was initially used. Then a model based on real data was created. Therefore, the paper combines the real and modeled data to serve as data for further calculations. The research methodology adopted is intended to indicate how many transportation processes can be improved by optimizing truck loading.

This case study focuses on road transport of large-sized roundwood in accordance with Regulation 51 of the Director General of the State Forests (DGSF) of 2019 and Regulation No. 54 of the DGSF of 2020 [25,26]. The form and type of wood determines the type and maximum permissible gross weight of the vehicle combination. The type of timber adopted for the study concerned large-dimensional sorts, the dimensional range of which includes a diameter of more than 14 cm at the upper end, and a length of more than 2.5 m. According

to the Polish standard PN-D-95 000, when calculating the volume of a piece of wood with a length of 3–5 m, conversion factors are used ( $0.61 \text{ m}^3 = 1 \text{ piece}$ ), and for wood with a length of more than 5 m, each piece must be individually measured. The loading measurement of round raw material was based on timber receipts at the storage site. Measurements of the permissible weight of a vehicle combination (vehicles coupled to move on the road as a whole) [27] were obtained from the technical data sheets of vehicle combination manufacturers. When calculating the payload of the vehicle combination, regardless of the calculation method used, a pine timber load of  $25 \text{ m}^3$  or  $30 \text{ m}^3$  (depending on the declared equipment of the truck) was taken into account. Delivery of the raw material was carried out in accordance with the guidelines of the Road Traffic Law [27]. In this case study, the research included vehicles with a permissible load of 40 Mg, self-loading vehicles with a permissible capacity of  $25 \text{ m}^3$ , and vehicles without auxiliary equipment with a permissible capacity of  $30 \text{ m}^3$  [28]. In relation to the actual weight of vehicle combination, their maximum permissible load of 40 Mg was assumed in further analysis. In the real world for individual companies, logistics programs are used to optimize the use of transportation means by filling them optimally. Such cooperation is simpler when the freight carrier has flexible transportation facilities. Cargo consolidation, then, can be considered crucial for low-carbon supply chain solutions. This paper evaluates loadings for 67 types of vehicles, where the problem of designing multi-carrier transportation pooling strategies in a supply chain is examined. The purpose of the paper is to examine the impact of these collaborations on  $\text{CO}_2$  emissions reduction using a real-world event-based methodology. Using a case study of selected trucking companies, strategies for changing vehicle weight and GVW (permissible gross vehicle weight) to lower  $\text{CO}_2$  emissions compared to a supply chain without pooling are examined.

When considering the economic and environmental transportation cost, attention was paid to two key parameters: distance and fuel consumption level. Their contribution to the total transportation cost is significant and may vary. Factors influencing the transportation cost include the price of fuel and its consumption, which depends on the optimization of vehicle utilization, vehicle travel distance, or vehicle speed.

Tables 1 and 2 provide a summary of fuel prices in Poland in 2022. Prices in euros were calculated based on exchange rates provided by the National Bank of Poland. The average price of diesel fuel for 2022 was  $\text{€}1.41/\text{L}$  [29].

**Table 1.** Min, max, and average prices in Poland for 12 months of 2022.

Fuel Type	E 95	E 98	Diesel	LPG
	EUR/L *			
Min	1.15	1.20	1.15	0.57
Max	1.70	1.82	1.72	0.78
Average	1.43	1.54	1.41	0.70

\*—according to the average annual exchange rate of the National Bank of Poland. Source: based on [30,31].

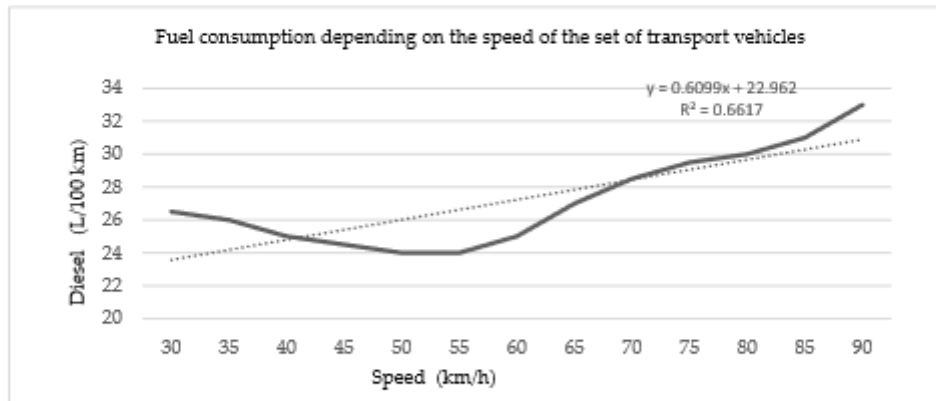
**Table 2.** Average monthly diesel prices in Poland in 2022.

Diesel Price in Poland												
Months	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
EUR/L *	1.28	1.19	1.54	1.55	1.56	1.66	1.61	1.53	1.57	1.68	1.67	1.64

\*—according to the average annual NBP exchange rate. Source: based on [30,31].

Both the vehicle's tonnage and its speed translate into average combustion, which is in the range of 24–33 L/100 km (Figure 1). For the purposes of this study, after verifying data from the prevailing transport companies in Poland, an average value of 29 L/100 km was assumed. The reduction of combustion in transport vehicles is so significant that an effort to minimize the number of transits should take into account sets of vehicles in large

transport fleets. This translates not only into lower fuel consumption costs, but also into lower emissions of harmful substances and greenhouse gases into the atmosphere.



**Figure 1.** Combustion variability depending on the speed of movement of the vehicle combination up to 40 Mg. Source: based on [32].

The authors focused their work on the cost of fuel because:

- it represents a significant item in the operating costs of transport companies—fuel costs can account for up to approximately 30–50% of total costs,
- fuel prices in the analyzed area of the country are comparable; hence, in the presented example, it was possible to take averaged prices for calculations.

The remaining transportation costs, both variable and fixed, vary widely among the different operators and depend on many factors, such as the fleet owned (including vehicle vintage, mileage, vehicle make), wages, number of customers, or order book.

Thus, changing the weight of the goods transported significantly affects the unit cost of transportation. Transporting goods by low-capacity vehicles over long distances becomes economically unjustifiable. In order to make the transport process optimal, it is necessary to strive for maximum utilization of vehicle cubic capacity, while complying with the applicable road regulations. Such action will reduce fuel costs.

Calculations took into account both the cost of transportation fuel and the use of transportation means in relation to the allowed amount of pine wood raw material. As a result of the study, it was determined, among other things:

- percentage of deliveries on an annual basis,
- potential number of transits, depending on the vehicle payload and delivery distance for the assumed pool of 1 million m<sup>3</sup> of raw material,
- total CO<sub>2</sub> emissions achieved as a result of the distance traveled by transport vehicles with a permissible load of 40 Mg,
- estimated deviation in the weight of transported cargo,
- estimated fuel costs as a function of specific vehicle payloads.

The analyzed period was the full year of 2021, during which the vehicles were used evenly. In the course of the study, the following were determined: the distance of the loaded trip and the volume of the transported wood.

Transport vehicles were used in the area of nine designated regional directorates to transport pine raw material to timber plants over a distance in the range of 40–530 km. Based on the verified amount of 1 million cubic meters of large-size pine timber transported, the percentage of transports carried out over each distance was determined. The distances covered are presented in intervals of 10 km.

The simulation concerns the evaluation of the defined volume of vehicles only (up to 25 m<sup>3</sup> and up to 30 m<sup>3</sup>). At the same time, the impact of using an intermediate fill of 27 m<sup>3</sup> was simulated, which can be justified in situations of vehicle overloading or carrying an incomplete load.

In the research, data was obtained from five transport companies with diverse transport sets with an indication of the actual tare weight of the vehicle combination compared to the gross vehicle weight after loading. A total of 67 types of vehicle sets were separated on this basis. The results were compiled for 37,040 transports over 49 distances with spacing every 10 km. The group included sets with the ability to load up to 25–27 m<sup>3</sup> of pine timber (with a regulatory density of 740 kg/m<sup>3</sup>) and with a loading volume of 27–30 m<sup>3</sup> of pine timber.

The simulation of the process of utilization of transport means assumed the evaluation of the degree of utilization in sets of cars loaded with pine wood in quantities 25–27 m<sup>3</sup> and 27–30 m<sup>3</sup>, in relation to the multiples of completed courses in the analyzed delivery distances.

Reference was made to the evaluation of the level of use of cars with a capacity of up to 30 m<sup>3</sup> of pine wood as the maximum permissible filling of a set of transport vehicles in Poland in accordance with the DMC of 40 Mg. At the same time, the simulated indirect loading was verified, increasing the actual loading volume for heavy-duty autos from 25 m<sup>3</sup> to a hypothetical volume of 27 m<sup>3</sup>, and reducing the loading volume from the actual 30 m<sup>3</sup> to a hypothetical 27 m<sup>3</sup>. The simulation is intended to show the effect of mass from the load on potential economic effects in the form of the cost of fuel burned, and environmental effects in the form of CO<sub>2</sub> emissions.

Reduction of fuel consumption is extremely important, as vehicle exhaust contains a large proportion of toxic compounds, emitted by the engine. Hence, not only the type of harmful substances matters, but also their concentration. For the environment, CO<sub>2</sub> is the greatest problem. The exhaust also contains other pollutants, but due to their trace amounts, they were not considered in the study. CO<sub>2</sub> emissions from anthropogenic sources, and therefore vehicle exhaust, contribute to the greenhouse effect. Therefore, it is important to increase the environmental awareness of the public, which affects the correct and economical operation of vehicles, and as a result carries the possibility of reducing greenhouse gas emissions. In the study, in accordance with literature data, it was assumed that 1 L of diesel generates an average of 2.68 kg of CO<sub>2</sub> [33,34].

#### *Statistical Analysis*

Statistical analysis was carried out to assess the differences in the effect of load capacity selection on the economic and environmental performance index between the variants of the three simulated processes. The analysis included one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Tukey's post hoc tests. The program R was used for the calculations as a statistical system. R is available as free software under the terms of the GNU Free Software Foundation's GNU General Public License [35].

### **3. Results**

The present study analyzed the transportation of softwood carried out by the analyzed entity during the period under consideration, using simulated deliveries for a volume of 1 million m<sup>3</sup> of large-size roundwood, transported to timber industry customers. For the assumed volume of transported raw material, the distances covered were also determined (Table 3).

As can be seen from Table 3, depending on the region analyzed, roundwood was transported over average distances with lengths ranging from 93 to 424 km. These deliveries occurred at the peak of demand for roundwood where the study evaluated the transportation of 1 million cubic meters of pine raw material, with the total harvest of large-size coniferous timber in Poland in the analyzed year at 15 million cubic meters [36]. This situation resulted in a maximum distance in road transport of 530 km, which referred

to 0.01% of the total amount of timber transported with a noticeable downward trend. The largest amount of roundwood was transported at a distance of up to 40 km, which accounted for about 23% of the delivered volume of pine raw material.

Table 3. Distance of transported timber in 2022.

Forest Districts	Zielona Góra	Poznań	Wrocław	Szczecin	Olsztyń	Pila	Szczecinek	Gdańsk	Toruń	In Total
Distance	km									
N courses (pcs)	126	302	300	733	3555	2033	2908	5127	21,956	37,040
min	310	175	300	240	80	140	130	50	40	40
mean	378	238	424	308	173	197	194	129	93	285
max	430	300	530	380	285	250	250	200	145	530
SD	35.72	40.36	58.47	40.81	45.59	30.51	31.24	55.44	30.69	144.31
V	1276	1629	3418	1665	2078	931	976	3073	942	20,825

Source: own study.

Taking into account the actual volume of raw material transported and the maximum permissible vehicle volumes of 25 m<sup>3</sup> and 30 m<sup>3</sup>, and the average of 27 m<sup>3</sup>, discrepancies are indicated, which point to overloading as well as underloading of vehicles (Tables 4 and 5).

Table 4. Weight of the vehicle combination with the timber self-loading system in 2022.

Weight of the Combination of Vehicles	GVW * (40 Mg)—Mass of the Vehicle Combination	Capacity	The Difference between the Actual Volume and the Maximum Volume of 25 m <sup>3</sup>		The Difference between the Actual Volume and the Maximum Volume of 27 m <sup>3</sup>	
kg	kg	m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup>	%
22,105	17,895	24.18	-0.82	-3.27	-2.82	-10.44
21,450	18,550	25.07	0.07	0.27	-1.93	-7.16
21,000	19,000	25.68	0.68	2.70	-1.32	-4.90
20,775	19,225	25.98	0.98	3.92	-1.02	-3.78
20,650	19,350	26.15	1.15	4.59	-0.85	-3.15
20,530	19,470	26.31	1.31	5.24	-0.69	-2.55
20,500	19,500	26.35	1.35	5.41	-0.65	-2.40
20,455	19,545	26.41	1.41	5.65	-0.59	-2.18
20,300	19,700	26.62	1.62	6.49	-0.38	-1.40
20,285	19,715	26.64	1.64	6.57	-0.36	-1.33
20,190	19,810	26.77	1.77	7.08	-0.23	-0.85
19,825	20,175	27.26	2.26	9.05	0.26	0.98
19,800	20,200	27.30	2.30	9.19	0.30	1.10
19,767	20,233	27.34	2.34	9.37	0.34	1.27
19,745	20,255	27.37	2.37	9.49	0.37	1.38
19,605	20,395	27.56	2.56	10.24	0.56	2.08
19,585	20,415	27.59	2.59	10.35	0.59	2.18
19,556	20,444	27.63	2.63	10.51	0.63	2.32
19,500	20,500	27.70	2.70	10.81	0.70	2.60
19,390	20,610	27.85	2.85	11.41	0.85	3.15
19,320	20,680	27.95	2.95	11.78	0.95	3.50
19,315	20,685	27.95	2.95	11.81	0.95	3.53
19,290	20,710	27.99	2.99	11.95	0.99	3.65
19,195	20,805	28.11	3.11	12.46	1.11	4.13
19,175	20,825	28.14	3.14	12.57	1.14	4.23

Table 4. Cont.

Weight of the Combination of Vehicles	GVW * (40 Mg)—Mass of the Vehicle Combination	Capacity	The Difference between the Actual Volume and the Maximum Volume of 25 m <sup>3</sup>		The Difference between the Actual Volume and the Maximum Volume of 27 m <sup>3</sup>	
			m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup>	%
19,105	20,895	28.24	3.24	12.95	1.24	4.58
19,000	21,000	28.38	3.38	13.51	1.38	5.11
18,925	21,075	28.48	3.48	13.92	1.48	5.48
18,860	21,140	28.57	3.57	14.27	1.57	5.81
18,825	21,175	28.61	3.61	14.46	1.61	5.98
18,700	21,300	28.78	3.78	15.14	1.78	6.61
18,645	21,355	28.86	3.86	15.43	1.86	6.88
18,610	21,390	28.91	3.91	15.62	1.91	7.06
min	17,895.00	24.18	−0.82	−3.27	−2.82	−10.44
mean	20,243.09	27.36	2.36	9.42	0.36	1.32
max	21,390.00	28.91	3.91	15.62	1.91	7.06
V	689,352.26	1.26	1.26	20.14	1.26	17.27
DS	830.27	1.12	1.12	4.49	1.12	4.16

Source: own study for pine wood density of 740 kg/m<sup>3</sup>. \* GVW—permissible total weight.

The distance of realized transits necessary to transport the total amount of raw material analyzed was calculated for the actual load level based on a set of data from own surveys taking into account the provisions of the Road Traffic Law and the maximum permissible volume of pine wood transported in one transit for cars with a permissible capacity of up to 30 m<sup>3</sup> of raw material. The analyses indicated the maximum range of deliveries based on the reported timber receipts (raw material deliveries were marked at 10 km intervals). The data came from shipping documents for deliveries of pine coniferous raw material with an assumed density of 740 kg/m<sup>3</sup>. As transport companies use vehicles with a declared capacity in the range of 25 m<sup>3</sup>, which are equipped with additional loading equipment (hydraulic truck crane) or without loading equipment with a standard load volume of 30 m<sup>3</sup> pine timber, deliveries for vehicles with two load volumes and an average value of 27 m<sup>3</sup> were simulated in the calculations. The results for 37,040 transports over 50 distances show the influence of raw material transport distance on the optimization of transport means utilization and the potential number of transport cycles (Figure 2).

Taking into account the average price of diesel fuel (Diesel) in 2022 at 1.41 euros and the average consumption of diesel at 29 L/100 km, the fuel costs were calculated and the indicator of optimal filling of transportation means was established to reduce fuel consumption as well as economic and environmental costs associated with CO<sub>2</sub> emissions (Figure 3). The number of transits required to transport 1 million cubic meters of timber was calculated from the level of data taking into account the provisions of the Road Traffic Law and regarding the maximum permissible volume of pine timber transported in a single transit. The maximum range of deliveries based on timber receipts in the following structure was indicated: A—load volume of 25 m<sup>3</sup>; B—load volume of 27 m<sup>3</sup>; C—load volume of 30 m<sup>3</sup> (deliveries at 10 km intervals). The calculation data was simulated taking into account the actual percentage of deliveries made for vehicles with the indicated load volumes, which shows the effect of load volume on the number of transport cycles. As the study shows, it is the differences in fuel costs resulting from underestimation of vehicle load volumes that account for a significant proportion of total fuel costs on an annual basis. Opportunity costs resulting from the lack of vehicle DMC utilization (Tables 6–8) in the group of analyzed load volume of 25 m<sup>3</sup> on a car with a capacity of up to 27 m<sup>3</sup> represent a total of 7.58%, and the use of cars with a DMC of up to 30 m<sup>3</sup> with a load volume of up to 27 m<sup>3</sup> represents potentially 9.96%. The highest level of these costs relates to the use of cars with a GVW capable of loading 25 m<sup>3</sup> with the alternative of loading pine timber

on cars with a load volume of up to 30 m<sup>3</sup>, which represents a total of 20.16% of lost fuel consumption costs. Forest districts are the counties from which the wood was imported. Scores were established to represent the supply range. This supply range represented the number of observations for ANOVA evaluation.

Table 5. Vehicle combination weight for systems without timber self-loader in 2020.

Weight of the Combination of Vehicles	GVW (40 Mg)—Mass of the Vehicle Combination	Capacity	The Difference between the Actual Volume and the Maximum Volume of 30 m <sup>3</sup>		The Difference between the Actual Volume and the Maximum Volume of 27 m <sup>3</sup>	
			m <sup>3</sup>	%	m <sup>3</sup>	%
18,425	21,575	29.16	−0.84	−2.82	2.16	7.98
18,400	21,600	29.19	−0.81	−2.70	2.19	8.11
18,330	21,670	29.28	−0.72	−2.39	2.28	8.46
18,300	21,700	29.32	−0.68	−2.25	2.32	8.61
18,300	21,700	29.32	−0.68	−2.25	2.32	8.61
17,950	22,050	29.80	−0.20	−0.68	2.80	10.36
17,700	22,300	30.14	0.14	0.45	3.14	11.61
17,690	22,310	30.15	0.15	0.50	3.15	11.66
17,585	22,415	30.29	0.29	0.97	3.29	12.19
17,465	22,535	30.45	0.45	1.51	3.45	12.79
17,460	22,540	30.46	0.46	1.53	3.46	12.81
17,200	22,800	30.81	0.81	2.70	3.81	14.11
17,130	22,870	30.91	0.91	3.02	3.91	14.46
16,995	23,005	31.09	1.09	3.63	4.09	15.14
16,790	23,210	31.36	1.36	4.55	4.36	16.17
16,685	23,315	31.51	1.51	5.02	4.51	16.69
16,500	23,500	31.76	1.76	5.86	4.76	17.62
16,305	23,695	32.02	2.02	6.73	5.02	18.59
16,210	23,790	32.15	2.15	7.16	5.15	19.07
16,020	23,980	32.41	2.41	8.02	5.41	20.02
15,960	24,040	32.49	2.49	8.29	5.49	20.32
15,480	24,520	33.14	3.14	10.45	6.14	22.72
15,390	24,610	33.26	3.26	10.86	6.26	23.17
15,375	24,625	33.28	3.28	10.92	6.28	23.25
15,220	24,780	33.49	3.49	11.62	6.49	24.02
15,150	24,850	33.58	3.58	11.94	6.58	24.37
15,075	24,925	33.68	3.68	12.27	6.68	24.75
14,336	25,664	34.68	4.68	15.60	7.68	28.45
13,805	26,195	35.40	5.40	18.00	8.40	31.11
13,400	26,600	35.95	5.95	19.82	8.95	33.13
13,280	26,720	36.11	6.11	20.36	9.11	33.73
13,098	26,902	36.35	6.35	21.18	9.35	34.64
11,763	28,237	38.16	8.16	27.19	11.16	41.33
11,350	28,650	38.72	8.72	29.05	11.72	43.39
min	21,575.00	29.16	−0.84	−2.82	2.16	7.98
mean	23,937.59	32.35	2.35	7.83	5.35	19.81
max	28,650.00	38.72	8.72	29.05	11.72	43.39
V	3,588,422.24	6.55	6.55	72.81	6.55	89.89
DS.	1894.31	2.56	2.56	8.53	2.56	9.48

Source: own study for pine wood density of 740 kg/m<sup>3</sup>. \* GVW—permissible total weight.

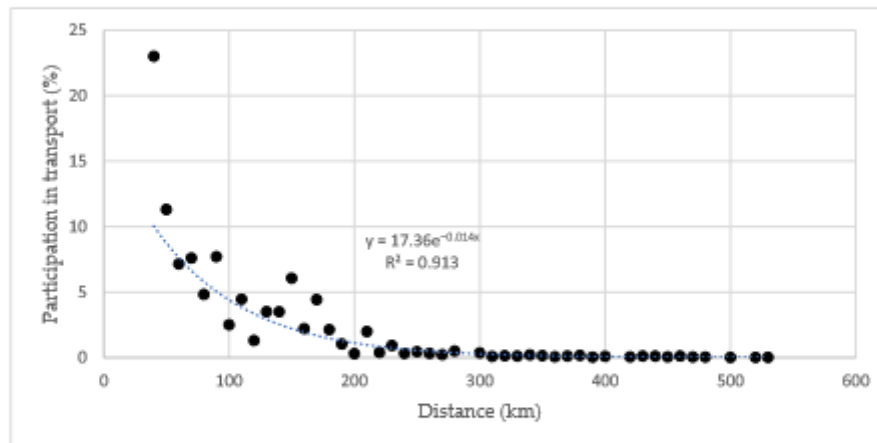


Figure 2. Distribution for the distance of transported timber in 2022. Source: own study.

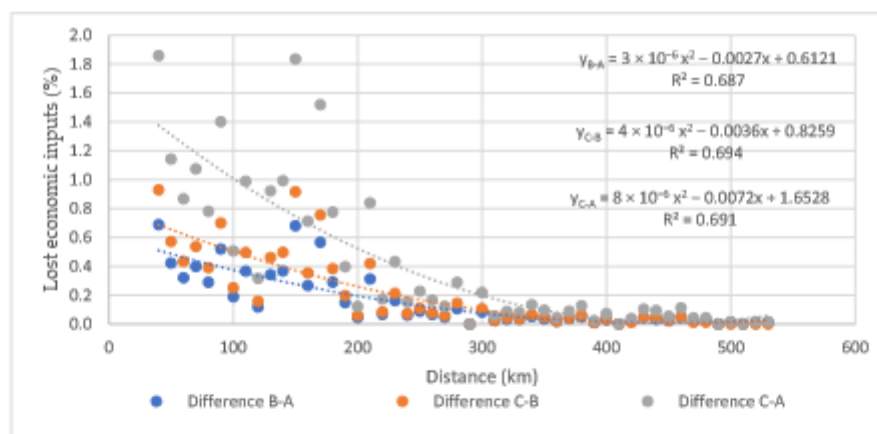


Figure 3. Distribution of the costs of lost profits in the transport of 1 million m<sup>3</sup> of raw material for the tested distances in 2022. Source: own study. A—vehicles up to 25 m<sup>3</sup>; B—vehicles up to 27 m<sup>3</sup>; C—vehicles up to 30 m<sup>3</sup>.

Statistical analysis of the studied dependences of actual and potential financial measures to reduce fuel costs indicates the significance of the factor of vehicle combination selection in the evaluation of distance covered. Verification with the ANOVA test indicates a significant dependence of fuel cost on the loading weight of vehicles (Table 6).

The results obtained allow for statistical evaluation of the impact of load volume of road transport vehicle combinations with an average combustion of 29 L/100 km and a price per liter of diesel of 1.41 EUR, which provides an average of 40.89 EUR for a distance of 100 km in the analyzed year 2022 (Table 8).

**Table 6.** Effect of ANOVA of process selection size on log transport ( $p < 0.05$ ).

Summary of Data				
	Process Variant			Total
	A	B	C	
$\sum X$	3,245,537	2,999,628	2,700,915	8,946,080
Mean	64,910	59,992	54,018	59,640
$\sum X^2$	540,295,660,987	462,833,969,644	374,988,987,709	1,378,118,618,340
Std. Dev.	82,018.59	75,980.47	68,376.23	75,287.79
Result Details				
Source	SS	df	MS	F = 0.25986
Between variants	2,975,425,436.89	2	1,487,712,718.44	
Within variants	841,594,210,460.44	147	5,725,130,683.40	
Total	844,569,635,897.33	149		

"SS"—Variability, "df"—number of independent results, and "MS"—intergroup variance.

The established F-ratio value is 0.25986. The result is significant at  $p < 0.05$  level. Tukey's HSD (honestly significant difference) procedure, on the other hand, involves pairwise comparisons within ANOVA data. The F statistic indicates that there is an overall difference between the sample averages. Tukey's HSD test identifies that there is a difference between pairs of transportation test averages B and C and a slight level of difference between A and B. In contrast, there is a significant difference for pair A and C (Table 7).

**Table 7.** Pairwise comparisons of transport process variants with Tukey's test.

Pair		HSD <sub>0.05</sub> = 35,829.8536	Q <sub>0.05</sub> = 3.3484
A:B	Ma = 64,910.74 Mb = 59,992.56	4918.18	Q = 0.46
A:C	Ma = 64,910.74 Mc = 54,018.30	10,892.44	Q = 1.02
B:C	Mb = 59,992.56 Mc = 54,018.30	5974.26	Q = 0.56

**Table 8.** The impact of the choice of means of transport on the average level of fuel costs (diesel fuel = 1.41 EUR/l).

Fuel Cost One Cubes	Number of Transport Cubes			Cost Transport			Difference			Difference			
	A 20 m <sup>3</sup>	B 27 m <sup>3</sup>	C 38 m <sup>3</sup>	A 20 m <sup>3</sup>	B 27 m <sup>3</sup>	C 38 m <sup>3</sup>	B-A	C-B	C-A	B-A	C-B	C-A	
EUR	pcs			EUR			EUR			%			
Sum	40,000	37,013	33,316	3,346,537	2,999,628	2,700,915	-346,912	-298,730	-544,622	7.58	9.36	20.36	
mean	233.07	880	740	666	64,911	59,992	94,035	-4908	-904	-10,892	0.15	0.20	0.40
max	431.43	9700	8918	7666	380,940	228,641	242,279	-72,309	-27,620	-46,180	0.69	0.93	1.86
DS	118.02	1522	1456	1380	81,194	75,317	67,689	5908	7528	13,585	0.18	0.25	0.50
V	33,827.69	3,473,635	2,130,903	1,717,274	6,932,537,403	5,657,572,934	4,581,803,807	35,278,686	36,673,160	182,307,912	0.03	0.06	0.25

Source: own study.

From the environmental point of view, an important parameter in addition to the amount of fuel consumption, and therefore the cost of this fuel, is the level of CO<sub>2</sub> emissions and the possibility of its reduction. Table 9 summarizes the differences in diesel consumption that result from the load method of the considered types of transport vehicles, as well as the impact of such measures on CO<sub>2</sub> reduction.

**Table 9.** The level of CO<sub>2</sub> emission and its reduction depending on the selection of vehicle sets (emission of 2.68 kg of CO<sub>2</sub> with 1 L of diesel fuel).

Diesel Consumption	Diesel Fuel Consumption per Transport of 1 Million m <sup>3</sup> of Pine Wood (L)			Difference Diesel Consumption Reduction (L)			Difference CO <sub>2</sub> Emission Reduction (kg)		
	A 25 m <sup>3</sup>	B 27 m <sup>3</sup>	C 30 m <sup>3</sup>	B-A	C-B	C-A	B-A	C-B	C-A
25 L/100 km	1,984,310	1,833,960	1,651,330	150,350	182,630	332,980	402,938	489,448	892,386
29 L/100 km	2,301,800	2,127,394	1,915,543	174,406	211,851	386,257	467,408	567,760	1,035,168
33 L/100 km	2,619,289	2,420,827	2,179,756	198,462	241,072	439,534	531,878	646,072	1,177,950
Difference %							7.1	9.9	20.2

Source: own study.

The CO<sub>2</sub> reduction results from taking into account the reduction in transportation cycles. It translates into an actual reduction in the amount of fossil fuels consumed in the road transportation process, and at the same time reduces harmful CO<sub>2</sub> emissions into the atmosphere (Table 9). The reduction value is based on the level of combustion quality and, according to the demand distribution, with diesel consumption in the range of 25–33 L per 100 km, can represent a CO<sub>2</sub> reduction of 7–20%. Such a significant amount of reduced CO<sub>2</sub> (from 402,938 to 1,177,950 kg of CO<sub>2</sub>) applies to the transportation of 1 million m<sup>3</sup> of wood raw material, depending on combustion, i.e., 25 or 33 L/100 km, which is an average of 29 L/100 km.

#### 4. Discussion

The study on the supply of coniferous raw material to timber plants in western Poland determined the structure of full-load transports related to the periodic demand of these entities for wood. This structure is a consequence of changes in production intensity, which characterize the periodicity of market demand for wood products. At the same time, the scale of deliveries is due to the rationality of harvesting and preparing wood for collection on road vehicles. Increased deliveries in the area closely located from timber plants reflect a reasonable tendency to reduce the movement of large-sized timber. This is due, among other things, to the transportation costs, but also to frequent inspections on the roads, which as a result of detected irregularities in relation to the current regulations, end in fines [12,37]. When analyzing the transportation of roundwood, attention should be paid to the maximum permissible gross vehicle weight (GVW). With regard to the differences that exist between the countries of the European Union, an important aspect is the discussion of a maximum load for road transport and its adjustment to the actual DMC of transport vehicles [38,39]. In the transport process, there are conditions for verification of the actual load of vehicles transporting wood with an apparent density exceeding the values specified in standardized tables. The apparent density of pine wood varies over the course of a growing year and depending on the process of natural drying, as indirectly demonstrated in the paper and confirmed in the literature [17,19]. The identified small proportion of vehicles declaring excess weight may indicate a slight overloading of vehicles loading up to 30 m<sup>3</sup> of raw material, and a significant proportion of non-filling of declared vehicles, which is a violation of the utilization optimization of road transport in accordance with current regulations. With regard to the demand of wood plants for raw material, it was observed that the structure of road deliveries was determined by the dominant percentage of deliveries from the area up to 90 km, which is about 62%.

The actual results obtained in this study indicate that the DMC of vehicles transporting pine timber is less than the permissible use. On the other hand, from the economic point of view, just as from the environmental point of view, it is advisable to fully utilize the maximum permissible gross weight of vehicles transporting roundwood, which may affect a smaller number of transits with a lower total environmental cost.

However, it should be emphasized that despite the significant advantages of using the vehicle DMC, this solution is not always used in practice, among other things due to the

availability of prepared raw material in the receiving areas of forest districts. Nonetheless, efforts to optimize the fulfilment of wheel transportation means suggest that reducing fuel consumption is a realistic goal for the freight sector [40]. However, changes in DMC may have limitations triggered by Commission Regulation (EU) 2019/318 of 19 February 2019 [41] amending Regulation (EU) 2017/2400 [42] and Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council [43] to CO<sub>2</sub> emission levels of 15% by 2025 and 30% by 2030 [5]. The regulation provides for gradual reductions in fuel consumption by heavy-duty vehicles. The 2019/2020 emissions were used as the baseline [44].

The change in the maximum permissible load for road transport should be accompanied by a review of the actual weight of vehicle combinations and the volume of wood raw material types used. As a result, it will be possible to reduce both the number of loads through the achieved DMC maximum permissible weight and reduce the range of wheeled transport. Increased maximum permissible weight of vehicle combination, as is the case in other European countries, may also have a positive effect on reducing the transportation costs of wood raw material. All these optimization measures contribute to reducing the carbon footprint at various stages of the supply chain. They can also support the sustainability of supply chain development and the sustainability policies of participating companies.

In the transportation sector, sustainability is based on an analysis of its environmental impact through the sector's consumption of fossil fuels and CO<sub>2</sub> emissions. According to ICCT (International Council on Clean Transportation) data, the average fuel consumption of trucks between 2000 and 2015 was around 36 L/100 km. This indicates that in recent years, there has been an effort to reduce fuel consumption to an average of 29 L/100 km, which is specifically addressed in this study [45,46]. It has been assumed that loading volume can have a positive impact on traffic situations, especially when transport density is high.

Hence, there is a need for a system to supervise loading and unloading times in real time. In this study, a solution is developed to the movements resulting from the possibility of loading raw material during the release hours of the Forest Service, which significantly limits the flexible control of traffic congestion. The system used in the transportation of roundwood is based on the need to maintain the continuity of production of wood plants and require real-time traffic, such as the shift work of enterprises. Using the collected data, decision support for road availability can be developed. Traffic volumes can be evaluated using fuzzy logic for users, thereby increasing transparency in mobility operations and reducing transportation costs and times [47].

## 5. Conclusions

It has been shown that under Polish conditions of wheeled transport of pine raw material, the maximum distance realized was 530 km, and the dominant distance (for 62% of recipients) was up to 90 km.

The distance over which the raw material is transported depends on the supplier and the destination of deliveries. The procedure used to maximize the loading of transportation means should take into account environmental costs. Increased loading weights from 25 m<sup>3</sup> to 27 m<sup>3</sup> and borderline to 30 m<sup>3</sup> allows for a reduction in the number of trips of 7–16%.

Reducing fuel consumption and consequently reducing CO<sub>2</sub> emissions in transportation can improve the efficiency of vehicle use in the delivery process. Increasing vehicle payload capacity translates into a reduction in the number of trips and the total cost of fuel consumption. A limitation on the use of vehicles is the permissible gross weight of a set of vehicles.

Increasing the GVW of a vehicle can positively affect the actual reduction in fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions. In the case analyzed for the wheeled transport of pine raw material, decreases in fuel (ON) costs can reach from 7% to 20%.

Maximum utilization of the cargo volume of transport vehicles can be achieved by improving the organization of the process of preparing wood raw material for transport. The storage of multiples of the volume of a single load at pick-up points in individual forest

districts can be an element of optimizing the use of transport vehicles and a solution for reducing fuel costs and CO<sub>2</sub> emissions.

**Author Contributions:** Conceptualization, Z.S.; methodology, Z.S.; software, M.W.; validation, M.W. and K.M.; formal analysis, Z.S. and M.W.; investigation, M.W.; resources, Z.S.; data curation, K.M. and K.A.; writing—original draft preparation, M.W.; writing—review and editing, Z.S., M.W., K.M. and K.A.; visualization, M.W. and Z.S.; supervision, K.A.; project administration, Z.S.; funding acquisition, Z.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** All data generated or used during the study appears in the submitted article.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. European Union Forestry Strategy, Office of Studies and Expertise, Department of Economic and Social Analysis, 2005. No 1145. Available online: [http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004\\_2009/documents/com/com\\_com](http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/2004_2009/documents/com/com_com) (accessed on 28 March 2023).
2. Tsiaras, S.; Andreopoulou, Z. Forest Policy Evaluation in European Countries Using the PROMETHEE Method. In *Advances in Operational Research in the Balkans XIII Balkan Conference on Operational Research*; Springer Proceedings in Business and Economic; Mladenović, N., Sifaleras, A., Kuzmanović, M., Eds.; Springer Nature: Cham, Switzerland, 2020; pp. 95–109, ISBN 978-3-030-21989-5. Available online: [https://books.google.pl/books?hl=en&lr=&id=hAilDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA95&ots=NuHyk6rFGm&sig=ZTCnlOhNgJyXlEubvds1yusaVsw&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pl/books?hl=en&lr=&id=hAilDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA95&ots=NuHyk6rFGm&sig=ZTCnlOhNgJyXlEubvds1yusaVsw&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false) (accessed on 21 January 2023).
3. Green Paper on Forest Protection and Information in the EU: Preparing Forests for Climate Change. Available online: <https://ec.europa.eu/environment/forests/gp.htm> (accessed on 20 March 2023).
4. European Parliament Resolution of 28 April 2015 on a New EU Forest Strategy: For Forests and the Forest-Based Sector (2014/2223(INI)). Available online: [http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126\\_PL.html](http://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0126_PL.html) (accessed on 15 January 2023).
5. Communication: New EU Forest Strategy for 2030. Available online: [https://commission.europa.eu/document/download/cf3294e1-8358-4c93-8def-3e1503b95201\\_en](https://commission.europa.eu/document/download/cf3294e1-8358-4c93-8def-3e1503b95201_en) (accessed on 20 March 2023).
6. Journal of Laws [Dz.U.] 2018.0.2129; Law of 28 September 1991 on Forests, Art. 6. Available online: <http://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20180002129/T/D20182129L.pdf> (accessed on 22 March 2023).
7. National Standard PEFC PL 1003:2012—Sustainable Forest Management—Requirements, Chapter 4. Sustainable Forest Management Criteria. Available online: [www.pefc.pl/images/PEFC\\_PL\\_1003v2-pol\\_final.pdf](http://www.pefc.pl/images/PEFC_PL_1003v2-pol_final.pdf) (accessed on 28 March 2023).
8. Towards a Sustainable Europe by 2030. European Commission COM (2019) 22 of 30 January 2019, Brussels. Available online: [https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/rp\\_sustainable\\_europe\\_30-01\\_en\\_web.pdf](https://ec.europa.eu/commission/sites/beta-political/files/rp_sustainable_europe_30-01_en_web.pdf) (accessed on 20 March 2023).
9. Wiederkehr, P.; Gilbert, R.; Crist, P.; Caïd, N. Environmentally Sustainable Transport (EST): Concept, Goal, and Strategy—The OECD's EST Project1. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/313697298\\_Environmentally\\_Sustainable\\_Transport\\_EST\\_Concept\\_Goal\\_and\\_Strategy-The\\_OECD\\_V1\\_textquoterights\\_EST\\_Project](https://www.researchgate.net/publication/313697298_Environmentally_Sustainable_Transport_EST_Concept_Goal_and_Strategy-The_OECD_V1_textquoterights_EST_Project) (accessed on 28 March 2023).
10. Conrad, J.L., IV. Costs and Challenges of Log Truck Transportation in Georgia. *Forests* **2018**, *9*, 650. [CrossRef]
11. Leśkiewicz, K. Implementation of sustainable forest management in local, regional and global dimensions—Selected legal aspects. (Realizacja zrównoważonej gospodarki leśnej w wymiarze lokalnym, regionalnym i globalnym—Wybrane aspekty prawne). *Przegląd Prasa Rolnego* **2018**, *46*, 77–90. [CrossRef]
12. Regulation of the Minister of Infrastructure of 25 January 2018. (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z Dnia 25 Stycznia 2018 r. w Sprawie Sposobu Przewozu Ładunku). Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20180000361/O/D20180361.pdf> (accessed on 28 March 2023).
13. Road Traffic Act of 20 June 1997 (Ustawa z Dnia 20 Czerwca 1997 r. o Ruchu Drogowym). Available online: <http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU19970980602/U/D19970602Lj.pdf> (accessed on 14 November 2019).
14. General Inspectorate of Road Transport. Available online: <https://gitd.gov.pl/dla-mediow/aktualnosci/artykul/news/nieprawidlowosci-w-transportcie-drewna/> (accessed on 28 March 2023).
15. Department of Infrastructure. Information on the Results of the Inspection. Performance of Tasks by Voivodeship Road Managers in the Field of Road Maintenance, Repairs and Protection. Available online: <https://www.nik.gov.pl/plik/id,17534,vp,20106.pdf> (accessed on 28 March 2023).
16. Decoux, V.; Varcinb, É.; Leban, J.-M. Relationships between the intra-ring wood density assessed by X-ray densitometry and optical anatomical measurements in conifers. Consequences for the cell wall apparent density determination. *Ann. For. Sci.* **2004**, *61*, 251–262. [CrossRef]

17. Witkowska, J.; Lachowicz, H. Variability of conventional wood density of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) depending on the selected factors. *Sylvan* 2013, *157*, 336–347.
18. Tomczak, A.; Wesolowski, P.; Jelonek, T.; Jakubowski, M. Weight loss and green density changes of Scots pine pulpwood harvested and stored during the summer. *Sylvan* 2016, *160*, 619–626.
19. Mydlarz, K.; Wieruszewski, M. Problems of Sustainable Transport of Large-Sized Roundwood. *Sustainability* 2020, *12*, 203. [CrossRef]
20. Directive (EU) 2015/719 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 Amending Council Directive 96/53/EC Laying Down for Certain Road Vehicles Circulating within the Community the Maximum Authorised Dimensions in National and International Traffic and the Maximum Authorised Weights in International Traffic (Text with EEA Relevance). Available online: <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/22b313fc-f3bc-11e4-a3bf-01aa75ed71a1/language-en> (accessed on 28 March 2023).
21. Verkehrs Rundschau. Available online: <https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/zahlreiche-wirtschaftsverbaende-fordern-44-tonnen-lkw-2211764.html> (accessed on 28 March 2023).
22. First International Service: Transport and Forwarding. Available online: <http://www.psm.pl/informacje/wymiary.html> (accessed on 5 December 2022).
23. Krause, J.; Thiel, C.; Tsokolis, D.; Samaras, Z.; Rota, C.; Ward, A.; Verhoeve, W. EU road vehicle energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions by 2050—Expert-based scenarios. *Energy Policy* 2020, *138*, 111224. [CrossRef]
24. Jerbi, A.; Jribi, H.; Aljuaid, A.M.; Hachicha, W.; Masmoudi, F. Design of Supply Chain Transportation Pooling Strategy for Reducing CO<sub>2</sub> Emissions Using a Simulation-Based Methodology: A Case Study. *Sustainability* 2022, *14*, 2331. [CrossRef]
25. Order No. 51 of the Director General of the State Forests Dated September 30, 2019. (Sign: ZM.800.8.2019) on the Introduction of Technical Conditions in the Turnover of Wood Raw Material in the State Forests National Forest Holding. Available online: [https://drewno.zilp.lasy.gov.pl/drewno/Normy/zarzadzenie\\_nr\\_51\\_z\\_30\\_wrzesnia\\_2019\\_r\\_w\\_sprawie\\_warunkow\\_technicznych.pdf](https://drewno.zilp.lasy.gov.pl/drewno/Normy/zarzadzenie_nr_51_z_30_wrzesnia_2019_r_w_sprawie_warunkow_technicznych.pdf) (accessed on 23 March 2023).
26. Order No. 54 of the Director General of the State Forests dated September 29, 2020 on updating Order No. 51 of the Director General of the State Forests dated September 30, 2019 on the Introduction of Technical Conditions Applied in the Turnover of Wood Raw Material in the State Forests National Forest Holding by Introducing Errata to the Content of Its Annexes (Mark: ZM.800.12.2020). Available online: [https://drewno.zilp.lasy.gov.pl/drewno/Normy/zarzadzenie\\_54\\_z\\_dnia\\_29\\_wrzesnia\\_2020\\_r\\_-\\_errata\\_do\\_warunkow\\_technicznych.pdf](https://drewno.zilp.lasy.gov.pl/drewno/Normy/zarzadzenie_54_z_dnia_29_wrzesnia_2020_r_-_errata_do_warunkow_technicznych.pdf) (accessed on 22 March 2023).
27. Dz.U.2022.0.988 tj.—Law of June 20, 1997.—Law on Road Traffic, Art. 2 Item 49. Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.aspx?id=WDU20220000988> (accessed on 12 March 2023).
28. Pachuta, A.; Chojnacki, J. Vehicles for the transport of large-size timber. Efficiency of transport. *Autobusy* 2018, *19*, 93–96. [CrossRef]
29. Available online: <https://www.cargopedia.pl/europejskie-ceny-paliw> (accessed on 10 March 2023).
30. Available online: [https://www.wnp.pl/nafta/ceny\\_paliw/?&rodzaj\[on\]=on&rodzaj\[pb95\]=on&rodzaj\[pb98\]=on&rodzaj\[lpg\]=on&okres=0](https://www.wnp.pl/nafta/ceny_paliw/?&rodzaj[on]=on&rodzaj[pb95]=on&rodzaj[pb98]=on&rodzaj[lpg]=on&okres=0) (accessed on 28 March 2023).
31. Available online: <https://nbp.pl/statystyka-i-sprawozdawczosc/kursy/archiwum-tabela-a-csv-xls/> (accessed on 28 March 2023).
32. Available online: <https://omega-pilzno.com.pl/redukcja-spalania-ogranicznik/> (accessed on 28 March 2023).
33. Gronowicz, J. *Environmental Protection in Land Transport (Ochrona Środowiska w Transporcie Lądowym)*; Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji: Poznań-Radom, Poland, 2003.
34. Ubysz, A. *Energy Conservation in Motor Vehicles (Pozasamowanie Energii w Pojazdach Samochodowych)*; Wydawnictwo Politechniki Śląskiej: Gliwice, Poland, 2011.
35. R-4.3.0 for Windows. Available online: <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/> (accessed on 20 April 2023).
36. Statistical Yearbook of Forestry. 2022. Available online: [https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/5/1/statistical\\_yearbook\\_of\\_forestry\\_2022.pdf](https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/5/1/statistical_yearbook_of_forestry_2022.pdf) (accessed on 28 March 2023).
37. Directive 2008/68/EC of the European Parliament and of the Council of 24 September 2008. Available online: <https://lexparyency.org/eu/32008L0068/> (accessed on 20 March 2023).
38. Sosa, A.; Klvac, R.; Coates, E.; Kent, T.; Devlin, G. Improving Log Loading Efficiency for Improved Sustainable Transport within the Irish Forest and Biomass Sectors. *Sustainability* 2015, *7*, 3017–3030. [CrossRef]
39. Koirala, A.; Raj Kizha, A. Forest Trucking Industry in Maine: A Review on Challenges and Resolutions. Available online: [https://www.researchgate.net/publication/308365806\\_Forest\\_trucking\\_industry\\_in\\_Maine\\_A\\_review\\_on\\_challenges\\_and\\_resolutions](https://www.researchgate.net/publication/308365806_Forest_trucking_industry_in_Maine_A_review_on_challenges_and_resolutions) (accessed on 28 March 2023).
40. Delgado, O.; Rodriguez, F.; Muncrief, R. Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: 2020–2030. Time Frame. International Council on Clean Transportation Europe. 2017. Available online: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential\\_ICCT-white-paper\\_14072017\\_vF.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/EU-HDV-Tech-Potential_ICCT-white-paper_14072017_vF.pdf) (accessed on 28 March 2023).
41. Commission Regulation (EU) 2019/318 of February 19, 2019. Available online: <https://www.legislation.gov.uk/eur/2019/318/contents> (accessed on 28 March 2023).
42. Commission Regulation (UE) 2017/2400. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R2400> (accessed on 28 March 2023).

43. Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02007L0046-20180331> (accessed on 28 March 2023).
44. Commission Regulation (EU) 2019/318 of 19 February 2019 Amending Regulation (EU) 2017/2400 and Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council as Regards the Determination of CO<sub>2</sub> Emissions and Fuel Consumption of Heavy Duty Vehicles. Available online: <https://40ton.net/ue-zatwierdzilo-nowe-normy-emisji-co2-oraz-zuzycia-paliwa-produkcji-ciezarowek-maja-spore-wyzwanie/> (accessed on 28 March 2023).
45. Fuć, P.; Merkiś, J.; Ziółkowski, A. Effects of the Weight of the Load on the Emissions of CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and on the Fuel Consumption of a Heavy Goods Vehicle with a Total Mass of more than 12,000 kg. *Postępy Nauki i Techniki*. 2012. Available online: [http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPL2-0028-0004/c/httpnt\\_pollub\\_plpdfnr1504.pdf](http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPL2-0028-0004/c/httpnt_pollub_plpdfnr1504.pdf) (accessed on 28 March 2023).
46. Mehr als 20 Prozent Weniger in 20 Jahren. Dieserverbrauch von LKW. Available online: <https://www.welt.de/motor/news/article158319522/Dieserverbrauch-von-Lkw.html> (accessed on 28 March 2023).
47. Ho, G.T.S.; Tsang, Y.P.; Wu, C.H.; Wong, W.H.; Choy, K.L. A Computer Vision-Based Roadside Occupation Surveillance System for Intelligent Transport in Smart Cities. *Sensors* **2019**, *19*, 1796. [CrossRef] [PubMed]

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

4. Górna A., Wieruszewski M., Szabelska-Beręsewicz A., **Stanula Z.**, Adamowicz K.. Biomass price prediction based on the example of Poland. *Forests*. 2022, vol. 13 (issue 12), art. no. 2179; DOI: 10.3390/f13122179, (#4)

## Article

# Biomass Price Prediction Based on the Example of Poland

Aleksandra Górna <sup>1</sup>, Marek Wieruszewski <sup>2,\*</sup> , Alicja Szabelska-Beręsewicz <sup>3</sup>, Zygmunt Stanula <sup>1</sup> and Krzysztof Adamowicz <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Forestry Economics and Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland

<sup>2</sup> Department of Mechanical Wood Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland

<sup>3</sup> Department of Mathematical and Statistical Methods, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland

\* Correspondence: marek.wieruszewski@up.poznan.pl

**Abstract:** The aim of the study was to test the applicability of forecasting in the analysis of the variability of prices and supply of wood in Poland. It relies on the autoregressive integrated model (ARIMA) that takes into account the level of cyclic, seasonal, and irregular fluctuations and the long-term trend as tools for the assessment of the predictions of the prices of selected medium-sized wood assortments. Elements of the time series were determined taking into account the cyclical character of the quarterly distribution. The data included quarterly information about the supply (amount) and prices (value) of wood sold by state forests in the years 2018–2022. The analysis was conducted for the most popular assortments: logging slash (M2, M2ZE), firewood S4, and medium-sized wood SZAP. In the period studied (years 2018–2022), the average rate of price variation was widely scattered. The average rate of price variation for the M2ZE assortment amounted to 7%. The average rate for M2 assortment was 1%, while the medium-sized SZAP assortment displayed the greatest variation of 99%. This means that between 2018 and the present, the price increased by nearly 100%. No major fluctuations were observed for the S4 assortment and its average rate of variation amounted to 0%. The analysis found seasonal variation was observed only for S4 firewood, the price of which went up each year in October, November, and December. For this reason, the forecast was made with the seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) version of the model. It is difficult to forecast the price of wood due to variations in the market and the impact of global factors related to fluctuations in supply.

**Keywords:** wood market; wood prices; forecasting; seasonality of supply; slash; pulpwood; ARIMA; SARIMA



**Citation:** Górna, A.; Wieruszewski, M.; Szabelska-Beręsewicz, A.; Stanula, Z.; Adamowicz, K. Biomass Price Prediction Based on the Example of Poland. *Forests* **2022**, *13*, 2179. <https://doi.org/10.3390/f13122179>

Academic Editor: Carla Nati

Received: 14 November 2022

Accepted: 16 December 2022

Published: 19 December 2022

**Publisher's Note:** MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

In the process of forest resource management, the amount of wood harvested and its assortment structure should be optimised to adapt to market needs, depending on the changing economic conditions and considering changes in the European economy that take climate change into account in long-term strategies [1]. Empirical studies on the wood industry tend to focus on developing long-term supply scenarios, while globalisation has given rise to links between neighbouring wood markets, which implies that the domestic market responds to macroeconomic conditions [2]. Therefore, the significance of short and long-term economic forecasts [3,4] for the wood market is increasing. The analysis of supply on wood markets involves uncertainty related to climate change, the dying out of forest stands, and disaster risk. Other factors at play include technological progress in wood harvesting, as well as political and economic programmes resulting in legal restrictions [5,6]. Furthermore, regional aspects play an increasingly important role, and wood harvesting may be restricted due to the growing awareness of the social functions of forests [7–9].

Wood availability is a significant problem at the stage of designing development strategies for forest and wood areas when climate change and the role of forests in the process of carbon accumulation are taken into account [10,11]. Market prices for the available wood assortment structure change under the influence of multiple factors [12–14]. The prices depend, i.e., on demand from the wood industry, which, in turn, is influenced by the domestic and global economic climate [15,16]. In Poland, the supply of the resource is influenced by the available structure of assortments offered by State Forests—National Forest Holding (PGL LP). PGL LP is the dominant entity engaged in the supply of wood. It offers wood according to the accepted terms of sale set out in the legislation that determines detailed sales procedures and minimum prices. PGL LP is a non-corporate entity responsible for managing state forests in Poland. It has its own independent budget, and 90% of its revenue comes from the sale of wood. Coniferous forests account for more than half of the total forest area in Poland, while pine forests prevail at 60.2% of that area [17]. The Scots pine coexists with other tree species of economic significance, such as the European spruce and European silver fir (6.1% and 6.5%, respectively). Deciduous trees include the common oak and Cornish oak (7.7%), silver birch (7.3%), common beech (5.9%), and black alder (5.7%) [18]. Furthermore, wood harvesting is limited by numerous other forms of nature conservation, such as reserves and protected zones for animal and plant species [19]. The activity of PGL LP is subject to numerous legal regulations, especially with respect to the development and implementation of 10-year forest planning and management plans concerning the harvesting of wood as part of cutting and silvicultural measures. In Poland, wood is sold on the free market; however, PGL LP applies detailed procedures for entering into a purchase determined by the Director General of LP. Each year, the wood is divided into assortment and species groups and is offered in several procedures: online sale via the Wood and Timber Portal, “e-wood”, or through special auctions of valuable wood assortments, commercial negotiations, and on the basis of a retail price list. The Director General also makes decisions concerning initial prices and conversion coefficients for specific assortment and species groups. Detailed rules for the sale of wood are regulated by decisions of the Director General of the State Forests [20] that regulate the rules for signing contracts with enterprises as part of the so-called “purchase history” and free access to purchases at higher price levels [21,22]. In recent years, the share of small wood M2 and medium-sized wood S2A assortments (25%) in the total amount of wood sold by PGL LP has been on the increase (M2ZE-branch and chipped wood destined for woodchips for energy purposes with a minimum diameter of at least 5 cm without bark (7 cm in bark), the length or quality of which does not allow industrial use; M2 small-sized firewood up to 7 cm in diameter with a length of 0.5 m to 6.0 m; S4 medium-sized firewood up to 5 cm with a length of 0.5 m to 6.0 m) [20]. These assortments are most often used to produce heat energy in individual households as well as in biomass power plants. Due to the need for new sources of energy, where wood and wood residues are recognised as RES, the demand for these goods has definitely increased. The disaster situation caused by the bark beetle had an impact on the increased supply of biomass assortments; however, this was local in nature. Increased awareness of the crisis may have contributed to an increased demand for energy wood.

According to the regulations, wood prices are not the primary criterion regulating the amount of wood available on the market [23]; however, they are significant for optimising forest management planning [24,25]. Adjusting prices to the level of supply can be considered for optimising the benefits of price fluctuations [23,26]. Information on changes in wood prices is a source of knowledge used in the planning of the activities of timber companies and in the strategic planning of forest management. Therefore, studies explaining the mechanisms of shaping the wood market through changes in wood prices over time are the subject of numerous publications in Poland and in other countries [27–46]. Time series are used to consider the price performance of the wood market [47,48]. The application of appropriate predictive methods makes it possible to forecast changes in

wood prices [49–54]. Currently, most studies focus on analysing changes or trends in time series and on their role in the forecasting of market prices [55].

The forecasting of wood prices and supply has a long history in forest economics, with most studies being based on models of supply and demand in various geographical regions [42]. Flexibility in planning wood prices is especially important in the face of random events, such as windfalls or sudden economic changes. Meanwhile, in times of intensive economic growth, it is important to ensure a sufficient and stable supply of wood. The supply of wood influencing prices of the raw material is characterised by deviation from the planned levels. Depending on the cause, these changes can be divided into: irregular fluctuations (e.g., due to large-scale disasters), long-term trends [3], periodic fluctuations linked to the economic cycle, and seasonal fluctuations. Explaining the mechanisms behind wood price fluctuations is important for the revenues of forestry operators worldwide and for their customers (stability of supply), as well as for enterprises providing services related to wood harvesting and forest care. An element of inflationary factor in the price of the raw material is included. The authors used data in which this factor affects the proposed price. The effect of inflation on the price of timber can be inferred from the incurred cost of timber, which has increased under the influence of political and economic factors (e.g., the price of fuel, the cost of machinery, etc.).

The aim of this study was to apply temporal predictive models to identify fluctuations in irregular, cyclic, and long-term trends in the prices of small- and medium-size wood offered for sale by PGL LP in Poland.

## 2. Materials and Methods

The study involved the use of a predictive methodology that employs the autoregressive integrated moving average (ARIMA) model among its provisions. The topic of forecasting the price of wood raw material in Poland is an evolving one. The choice of ARIMA methodology is covered by numerous literature items, where the method has been used in many other fields, including with a strongly changing external area. Using the ARIMA ( $p, d, q$ ) model requires the estimation of  $p$ ,  $d$ , and  $q$  values. The meaning of these parameters is as follows:

$p$  is the autocorrelation parameter

$d$  stands for the degree of integration of a series

$q$  is the parameter of the moving average

The general ARIMA model can be presented as follows in Equation (1):

$$\varphi(B)\nabla^d z_t = \theta(B)a_t \text{ or } z_t = \sum_{i=0}^p \varphi_i z_{t-1} + \alpha_t - \sum_{k=1}^q \theta_k a_{t-k} \quad (1)$$

$\alpha_t$ — random disturbance;  $z_{t-1}$ — random disturbance at the moment  $t - 1$ .

where Equation (2):

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p \quad (2)$$

is a function related to the non-seasonal autoregressive parameter  $p$ , and where Equation (3):

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (3)$$

is the function associated with the associated non-seasonal moving average parameter  $q$  and the parameter  $B$  as the backward shift operator, which we can write as Equation (4):

$$B^p z_t = z_{t-p} \quad (4)$$

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_p \dots$  oraz  $\theta_1, \theta_2, \theta_q$  are unknown coefficients estimated on the basis of example data using approximate probability.

$\nabla^d = (1 - B)^d$ ,  $d$  is the backward shift operator of the  $p$ -th order, defined as Equation (5):

$$\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1} \text{ with } \nabla^d = \nabla \nabla^{d-1} \quad (5)$$

The SARIMA ( $p, d, q$ ) ( $P, D, Q$ ) model is an ARIMA model that takes into account the seasonality component ( $P$ —order of seasonal lags of the AR type,  $Q$ —order of seasonal lags of the MA type,  $D$ —differentiation of the seasonal component).

The mean absolute error (MAE) is calculated by:

$$\Delta x = |x - x_0| \quad (6)$$

$x$ —real value of price;  $x_0$ —forecast value of price; The mean absolute percentage error (MAPE) is calculated by:

$$\delta = \frac{|x - x_0|}{x} \times 100\% \quad (7)$$

The root mean squared error (RMSE) is calculated by:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |x - x_0|}{N}} \quad (8)$$

$N$ —number of observation.

Checking data integration is recognised as the first stage of the calculation. This means determining whether the data are stationary or can be converted to stationarity. When the data to be processed are stationary, we adopt the parameter  $d = 0$ ; when the data need to be converted, parameter  $d > 0$ . The Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin (KPSS) [56] test was used to determine data stationarity. The test verifies the hypothesis whether the process is stationary, in other words, whether it is expedient to take differences into account. As we begin to consider stationarity, we first subject raw data to the test. Data differencing processes are carried out until the data are stationary following the KPSS test.

To determine the other parameters  $p$  and  $q$ , the autocorrelation function (ACF) and partial autocorrelation function (PACF) are useful. Based on the ACF and PACF graphs, we can proceed to identify the autocorrelation parameter and the moving average. By comparing the graphs, we determine the growth levels of the data in the adopted periods and determine the likely variant of the ARIMA model.

In the study, variants of  $p$ ,  $d$ , and  $q$  parameters for each set of data for specific assortments were determined separately. The calculations were made with the “R” software, version 4.0.3 released in 2022 (GNU General Public License as published by the Free Software Foundation).

Data in the study were divided into individual assortments, such as residual wood M2ZE, firewood slash M2, medium-sized firewood S4 with the permissible level of soft rot set at 50%, minimum top diameter of 5 cm without bark, and general-purpose cordwood S2AP with the permissible level of rot at up to 50%, that meet the requirements complying with the definition of energy wood included in the directive 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 as a source of renewable energy. The data include quarterly data for the period 2018—second quarter of 2022, which provides exactly 18 observations for the forecast. The forecast was made for the three following quarters, more specifically, for Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023 (Figure 1).

The authors used data in which this factor affects the proposed price, which means using nominal prices. The study aims to forecast real prices. The additional inflation factor will not reflect actual prices.

The sensitivity analysis was performed in comparison with the third quarter of 2022, as this period can be considered closed, and PGL LP reported the data.



**Figure 1.** Quarterly prices for M2 ZE, M2, S2AP, S4 assortments in years 2018–2022. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (own elaboration based on the Computer Management Support System of the State Forests National Forest Holding).

Raw timber prices are linked to vertical price transmission. However, due to the sales procedures carried out by the forest manager, taking into account periodic sales cycles, their impact is significantly delayed. The impact factors are price changes in global and regional markets [57–60].

It is important to remember that wood prices are the key variable in forest management optimisation and its forecasting is subject to a high degree of uncertainty [47]. Time series methods ensure good results while requiring modest input data, which makes them especially useful in the analysis of forest management issues [61]. The choice of the ARIMA method, as well as of the ARIMA method that takes account of seasonality (SARIMA), was based on a literature review in which the authors attempted to make predictions in various areas of the economy. We need to agree with Broz and Viego [62], who claim that using predictive techniques and models in the area of forestry is still rare. However, attempts were made to apply these methods in forestry. An article [63] by Greek researchers who investigated the possibility of using the ARIMA modelling for firewood attracted the most attention. The results of their research were satisfactory. Broz and Viego [62] applied the ARIMA method to analyse the prices of wood in Argentina. Japanese researchers have successfully applied the exponential smoothing (ETS) method and autoregressive integrated moving average (ARIMA) models to forecast monthly prices of logs obtained from the three most important tree species in Japan [48]. Soares et al. [64] demonstrated that ARIMA was the appropriate model for the forecasting of prices of eucalyptus wood. Yin [65] used one-dimensional ARIMA models to forecast prices in the USA and concluded that short-term forecasts were precise enough to be adopted in practice. Hetemäki et al. [2] used one-dimensional and multi-dimensional models of time series and concluded that they may serve as a useful tool for short-term price forecasts for Finnish wood [66]. Kolo and Tzanova [39] used time series analysis for short- and medium-term forecasting of the size of exports and imports of raw wood and of prices in the German wood market. Autoregressive modelling was used to analyse the predicted changes of pine (*Pinus sylvestris* L.) prices in the four main regions of Finland on the basis of actual monthly prices of stumps between January 1995 and June 2005 [51]. The artificial neural network model and the ARIMA model were also used to forecast the wear of pine lumber [67] and for the prediction of

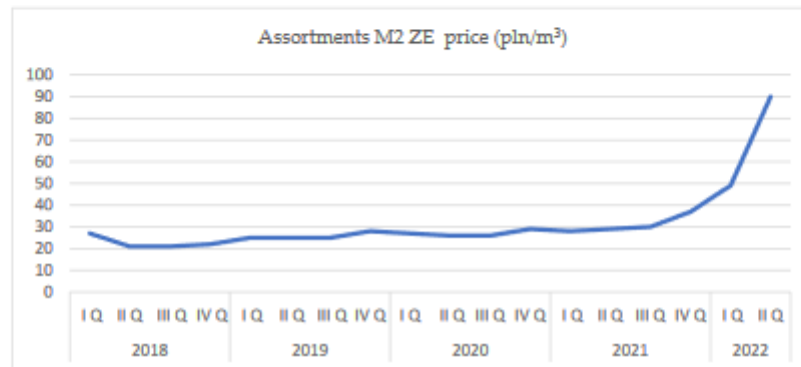
the price of plywood [68] and cellulose, lumber export prices in Brazil [65], and for wood rubber price prediction [69,70].

Examples of other disciplines in which the ARIMA model was used include medicine [71–79]; the energy industry [80,81]; environmental sciences [82–91]; fire protection [92]; the stock market and crypto-currencies [93]; and the food industry [94,95].

### 3. Results

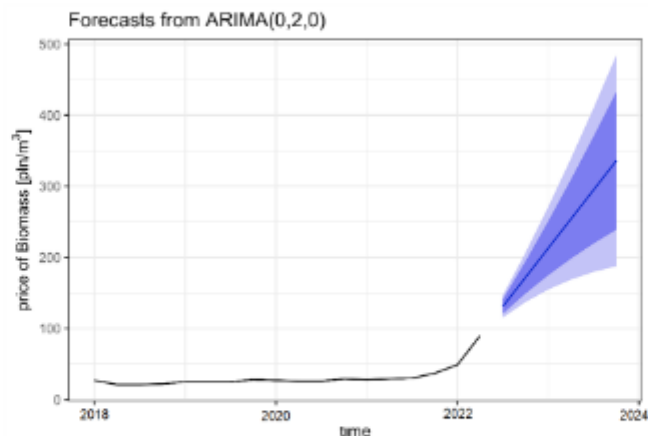
#### 3.1. Forecast for M2 ZE Assortment (Residual Wood)

Prices of residual wood ranged between 20 and 30 PLN/m<sup>3</sup>. We can observe a significant increase in the price in Q4 of 2021, which continued in Q1 and Q2 of 2022. This factor influences the forecasting procedure for the data provided (Figure 2).



**Figure 2.** Prices for the M2 ZE assortment at quarterly intervals in years 2018–2022. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

The ARIMA (0, 2, 0) model was used during the data analysis to assign relevant  $p$ ,  $d$ ,  $q$  parameters to the ARIMA method (Figure 3).



**Figure 3.** Price forecast for the M2 ZE assortment for Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

The values of the point forecast for residual wood are on an upward trend. It is a significant hike in the price compared to 2021 (Table 1). Comparing the prices in the first two quarters of 2022, which increased by an extremely large amount, gives rise to the anticipation of a further increase in the following years.

**Table 1.** Price forecast for M2 ZE assortment for Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP—own elaboration based on the Computer Management Support System of the State Forests National Forest Holding).

Time	Point Forecast (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 80* (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 80* (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 95* (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 95* (pln/m <sup>3</sup> )
2022 Q3	131	120.83	141.17	115.45	146.55
2022 Q4	172	149.26	194.73	137.23	206.77
2023 Q1	213	174.95	251.04	154.82	271.18

\* estimated value 80% and 95% confidence intervals.

### 3.2. Forecast for the M2 Assortment (Firewood Slash)

Price levels for firewood slash have not been subject to radical changes since 2018. A minor drop could be observed at the turn of Q4 of 2020 and Q1 of 2021. The trend line for the M2 assortment values can be regarded as stable (Figures 4 and 5).



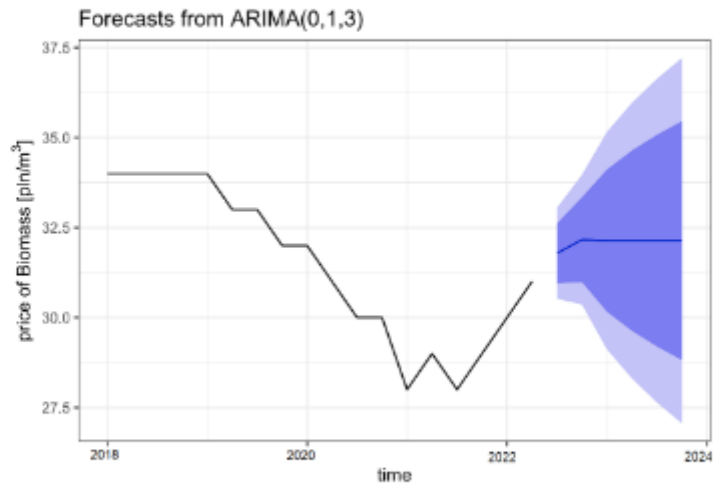
**Figure 4.** Prices for the M2 assortment at quarterly intervals in years 2018–2022. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

An analysis of the forecast for firewood slash indicates that prices remained at a stable level from quarter to quarter. Differences between quarterly prices ranged between PLN0.3 and PLN0.4 (Table 2).

**Table 2.** Price forecast for the M2 assortment in Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

Time	Point Forecast (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 80* (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 80* (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 95* (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 95* (pln/m <sup>3</sup> )
2022 Q3	31.79	30.96	32.61	30.52	33.05
2022 Q4	32.16	30.98	33.34	30.35	33.97
2023 Q1	32.14	30.16	34.11	29.12	35.15

\* estimated value 80% and 95% confidence intervals.



**Figure 5.** Price forecast for the M2 assortment in Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

**3.3. Forecast for the S2AP Assortment (General Purpose Cordwood)**

Interpreting the graph above (Figure 6), one can observe an increase in the price of general-purpose cordwood that has continued since Q4 of 2021. A comparison of price levels in the period between Q1 of 2018 and Q2 of 2022 shows that the price increased by more than 100%. The most significant increase took place in Q4 of 2021 (Table 3).

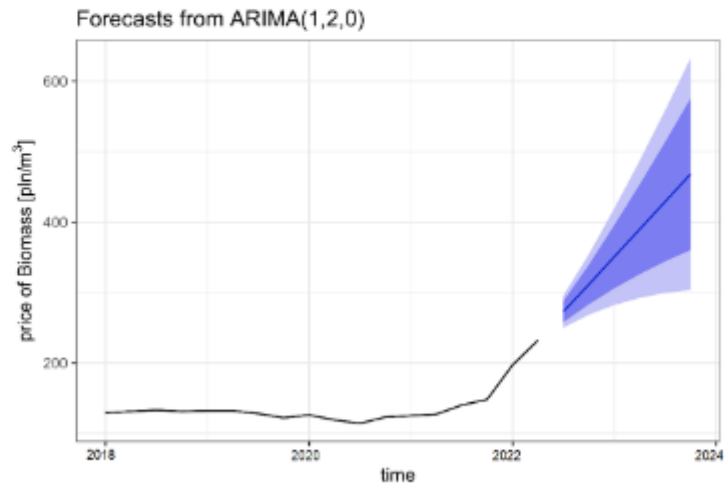


**Figure 6.** Prices for the S2AP assortment at quarterly intervals in years 2018–2022. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

**Table 3.** Price forecast for the S2AP assortment for Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

Time	Point Forecast (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 80 (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 80 (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 95 (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 95 (pln/m <sup>3</sup> )
2022 Q3	272.93	257.9	287.96	249.95	295.91
2022 Q4	311.35	283.3	339.4	268.45	354.25
2023 Q1	350.83	305.94	395.72	282.18	419.48

The price forecast values for the S2AP assortment (Figure 7) are distinguished by an upward trend. Differences between the forecasts range by PLN40/m<sup>3</sup>.



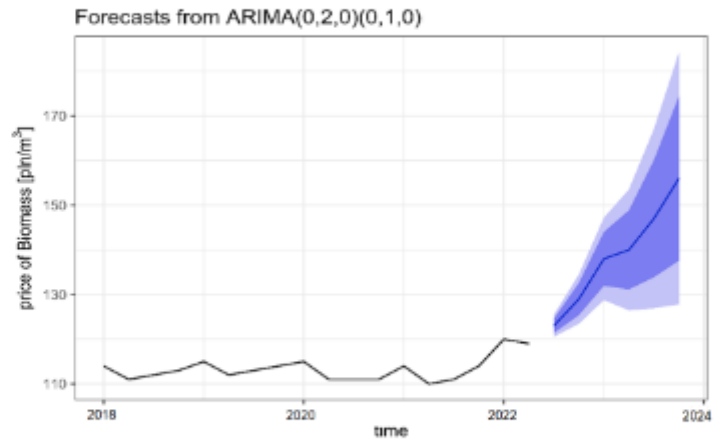
**Figure 7.** Price forecast for the S2AP assortment for Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

#### 3.4. Forecast for the S4 Assortment (Firewood)

The analysis of firewood price values has a seasonal characteristic (Figures 8 and 9). The increase in price levels takes place in quarters 4 and 1 of the subsequent years. That period covers the autumn and winter months, in which an increased demand for firewood is observed. However, attention needs to be paid to the significant price increase in Q3 of 2021 and to the fact that this situation continued in Q1 of 2022. The difference between the highest price noted in Q1 of 2021 and in Q1 of 2022 amounts to 5%, which significantly exceeds the difference between previous years.



**Figure 8.** Prices for the S4 assortment at quarterly intervals in years 2018–2022. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).



**Figure 9.** Price forecast for the S4 assortment in Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP) [4].

The characteristic of seasonality for the S4 firewood was established through data analysis (Table 4). Consequently, the SARIMA model, expanded by the seasonality factor, was applied.

**Table 4.** Price forecast for the S4 assortment in Q3 of 2022, Q4 of 2022, and Q1 of 2023. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

Time	Point Forecast (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 80 (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 80 (pln/m <sup>3</sup> )	Lo 95 (pln/m <sup>3</sup> )	Hi 95 (pln/m <sup>3</sup> )
2022 Q3	123	121.38	124.62	120.53	125.47
2022 Q4	129	125.39	132.61	123.47	134.53
2023 Q1	138	131.95	144.06	128.75	147.25

For the purpose of the forecast sensitivity test, actual prices for the third quarter of 2022 were taken into account, as this information was reported by PGL LP. The remaining periods are not finished, which makes it impossible to provide final data.

The results of the sensitivity test for the use of the ARIMA model to forecast forest biomass prices are presented above. The largest errors are characterised by the M2ZE assortments of approximately 45.56% of the percentage error, while the smallest error was found in the M2 assortment, where MAPE was 2.55% (Table 5).

**Table 5.** MAE, MAPE, RMSE results for Q3 2022. Source: Own elaboration based on data obtained from the State Forests IT System (SILP).

Assortments	M2ZE (pln/m <sup>3</sup> )	M2 (pln/m <sup>3</sup> )	S2AP (pln/m <sup>3</sup> )	S4 (pln/m <sup>3</sup> )
2022 IIIQ real	90	31	232	119
2022 IIIQ forecast	131	31.79	272.93	123
MAE	41	0.79	40.93	4
MAPE [%]	45.56	2.55	17.64	3.36
RMSE	41	0.79	40.93	4

#### 4. Discussion

The forms of trade in wood raw material are based on market prices of the sourced assortments, which are influenced by multiple factors. The global climate change that is being observed, the adjustment of regulations, and the increased logging caused by biotic and abiotic factors are the main factors influencing fluctuations in the wood trade in the last decade. The largest logging incidents are mainly related to the significant number of climate catastrophes causing damage to trees and an increased supply of roundwood on the market. In most cases, this fact resulted in a drop in wood prices or their partial stabilisation. In the future, the wood utilisation sector will be the most stable market, as the interest in and consumption of renewable sources of renewable biomass is on an upward trend. According to researchers, the EU's policies [6] contribute to that [96]. Due to these changes, there is currently strong competition in the firewood and industrial wood markets (pulp and paper industry), which leads to structural changes in the supply of wood. It is one of the key elements that will be influencing demand among wood producers in the near future.

There are specific factors that influence the wood trade in Poland. Price fluctuations on the market are distorted by the single dominating entity, which is PGL LP (responsible for 80% of managed forests in Poland), while all minor entities have to adjust their price strategies to the dominating entity. Price levels in the country depend on local supplies and economic needs on the market. Local influences, the structure of wood processing companies, and the specific approach to wood trade in Poland influence the structure of the wood assortment supplied to the industry. This is confirmed by the increase in the volume of wood delivered to the consumer, also in the case of the lowest quality assortments, in recent years. This has necessitated a change in the perception of the problem of wood price forecasting. Solving the problems of the wood market can be based on the monitoring of the development of the market of wood consumers in the country, as well as on the European and global markets, on the basis of the assessment of wood trade levels; making trade agreements; conducting assessments at the appropriate frequency; and reacting to these changes. Due to the high frequency in price changes at this point, we can opt for a short-term forecast, as the price level is also affected by the political and economic situation in the country. We are unable to predict correctly what prices will be in mid-2023, as external factors may change drastically. Therefore, the authors undertook to forecast only quarterly series in the near term. The inflation aspect was explained above.

Predictive analyses of price fluctuations have to focus on new sectors in forestry (carbon sequestration, carbon trading, renewable sources of energy). Wood processing plants have to concentrate on developing new products based on wood and on investing in wood processing technologies [97]. The wood industry exhibits a certain supply cyclicality [98] which results from complex interactions between market factors that determine the situation in the primary wood market (with regard to demand, prices, and supply of wood). Differences in the cyclicality of price fluctuations between different industries result largely from the durability of the product, as durable goods industries are several times more cyclic than non-durable goods industries [99]. It is also suggested that technological progress and changes in consumers' preferences determine long-term trends in the forest products sector [100]. Cyclic price patterns in the Polish market were largely connected with the condition of the national, European, and global economy and constituted the main factor responsible for general wood price fluctuations. The years 2018–2022 were a period of dynamic economic changes caused by an expansion in the economic development of the timber industry (in 2020). In addition to the increased demand for raw material from European Union countries, the increase in the supply of raw material in North America was significant. During the pandemic and the increase in demand for lumber in North America, the major lumber processors in Europe increased their lumber exports. European prices increased significantly due to the shortage of sawn materials, which translated into increased demand for roundwood [60,101].

Cyclic fluctuations can be observed that revealed large amplitudes in the real prices of wood in Poland, reaching PLN103/m<sup>3</sup> for the S2AP assortment in the years 2018–2022 and PLN63/m<sup>3</sup> for the M2ZE assortment. After two years of significant price increases, the collapse in demand translated into a drop in prices from Q1 of 2020, with a shift occurring in Q3 of 2021. The turning points for prices coincided with turning points for the European wood market. An upward trend in the real prices of wood was observed in the years 2018–2022. The situation in the European wood market was also linked to the phases in the global economic cycle. The drop in wood prices in European countries in 2019 was caused by the health crisis triggered by COVID-19. The construction and renovation increases are related to government stimulus packages following the COVID pandemic, as well as to the low bank interest rates at the time. Q1 and Q4 of 2019 brought a drop in sales. Cyclic price fluctuations coincided with the peak in the Polish wood economy (2021/2022) due to the growing demand from industry, especially construction. The growth in construction and renovation was linked to the government's stimulus packages after the COVID pandemic, as well as low bank interest rates at the time. Similar to 2019, supply diminished in Q1 of 2021. However, in Poland, demand for wood assortments does not always reflect trends in GDP [12]. The decline in demand for wood products was seen during periods of slower economic growth. This led to a decrease in timber harvesting. This consequently caused fluctuations in supply and increases in demand, which coincided with gradual cycles of price changes.

The price of wood derived from its supply (in terms of amount as well as assortment structure) depends primarily on the degree of implementation of forest management plans. Despite the volatility in global markets and the significant drop in demand in 2019, the State Forests managed to fulfil its sales plan, albeit at slightly reduced prices. Research [102] confirmed the high price elasticity for the supply of small- and medium-sized wood in Europe [103]. According to research conducted in Europe and on other continents, the price and supply of wood are shaped by market and non-market factors, depending on the products and the geographical region [104]. Industrial wood (M2, M2ZE, S2AP, and S4) displays a lower price elasticity than large-sized wood [105], which suggests that price fluctuations have less impact on the supply of pulpwood (industrial wood) than on sawmill wood. Taking into account the biomass assortments presented in the publication, which in 2021 were recognised as energy wood by the Director General of the State Forests, the quality and dimensional classification applicable in Poland was followed. This is due to, i.e., the situation in the US market, which resulted in higher prices of sawn timber and caused a rise in the prices of large-sized wood in a short period of time [106,107]. Analyses conducted with the application of predictive models [39,47,61,62] and, in the case analysed here, with the application of the popular ARIMA model [48,86,108], confirmed the occurrence of the predicted increases in the price of wood on the general level for the M2ZE and S2AP assortments by 45% and 17%, respectively, between Q2 of 2022 and Q3 of 2022 (forecast). The increase for the remaining assortments M2 and S4 was not significant (2%; 3%). The most significant increase in real prices was observed for the S2AP and M2ZE assortments, for which a major price hike could be observed at the turn of Q1 and Q2 of 2022. The prices of middle-sized wood peaked in Q3 of 2022. This ensures predictable revenues, at the same time restricting the possibility of making economically beneficial decisions during the year. Analysing information with the application of autocorrelation of the prices of wood raw material will make it possible to illustrate the seasonality of assortments. This situation can be observed with regard to the S4 assortment, which achieved greater popularity in the winter months (October–December). This applies to the price increase observed in that period. It also increases the price of fuel products for individual customers buying wood from private companies in the wood industry. The question arising at this point is what other wood assortments are seasonal as well.

The more stable the economy and the better the economic indicators, the lower the frequency and amplitude of wood price fluctuations. Natural disasters (such as windfalls or disease affecting spruce and pine stands) and other unpredictable events were local

and did not impact the supply of wood on a national scale, with the exception of spruce stands in the years 2017–2018 (degraded by the bark beetle) [109]. It can also be concluded that changes in local prices in degraded areas did not have a significant impact on the price of wood in Poland overall. Sourcing wood from stands damaged by the hurricane, which affected northwest Poland in August 2017, resulted in an additional supply of approximately 3 million m<sup>3</sup> of wood, also in 2018 (the annual harvest of wood in Poland is approximately 39 million m<sup>3</sup>) [110].

Price increases can be observed across Europe; however, comparing the predicted increase in wood prices between countries is complicated due to different quality requirements for definitions of assortment classes [111]. However, these can be simplified, using the M2, M2ZE, S2A, and firewood S4 assortments applied here [41]. It is important to note that prices of wood in neighbouring countries in Central Europe were similar (which suggests that there was room for a further increase in the Polish market). As stated earlier in the chapter, timber pricing in Poland is specific and includes periodic information on the inclusion of harvesting, skidding, and administration costs in the minimum price. If one of these factors increases, the price will also increase. The setting of the maximum price by the State Forests in previous years was intended to maintain the stability of the timber industry in Poland.

The high frequency of natural disasters in the whole of Central Europe (windfalls) had a negative impact on the prices of coniferous wood. There was an oversupply of spruce wood in Southern Poland. As prices in Poland were relatively low compared to Austria, transportation costs were acceptable, and currency exchange rates favourable, domestic and foreign companies showed more interest in the product, which led to price reductions [15]. Prices were lowered for Polish entrepreneurs who were the main recipients of wood, and such large fluctuations that have taken place recently have affected the overall price of wood raw material. For companies in the wood industry, these prices were high, which resulted in the lack of profitability of doing business. Such decisions have huge effects in the Polish economy, where the wood industry plays an important role. The indication S2A applies to wood in Poland, which, being already damaged, is not subject to such a strong decline in value as other roundwood sorts. Research conducted in Japan showed a correlation between lower monthly prices between June and August due to damage caused by pests [112]. Similar activities can be seen in Europe; however, due to the assumptions of sustainable development, European procedures are longer and not so strongly exposed. However, attention is included, and the impact of degradation in European countries is indicated [113]. Assortments with a medium diameter (S2A) showed greater price stability. No strong fluctuations in the prices of that assortment were observed; however, an evenly increasing price trend can be detected in the period investigated (2018–2022), which is due to the continuity of harvests. However, price forecasts point to significant increases in the value of that assortment.

The comparison of data with the application of the ARIMA model showed a significant increase in the prices that may be adopted by the State Forests in 2023, and in subsequent years, that is due to, i.e., the change in prices between the Polish and Western European markets on the one hand, and the Baltic and Scandinavian markets on the other [31].

In the face of the energy crisis in Central Europe, new solutions, relying on renewable sources of energy, are being explored. Measures intended to ensure access to heat and electricity are among the main considerations of specialists in the field. Assortments that were subjected to the analysis and forecasting can be used in the production of heat (as forest biomass), which relieves the burden of coal use. This adheres to the legislative documents of the Green New Deal [6], which defines the common climate and environment protection policy. The use of forest biomass as a renewable source of energy enables the reduction of the carbon footprint generated by the heat production industry. Access to real-time information about the price of the resource is highly significant for businesses operating in the wood industry and for private consumers who need to plan their short-term budgets. Attention should also be paid to the situation to the east of Poland. Among

the main suppliers of wood residues were countries such as Ukraine, Russia, and Belarus. Due to the war situation across Poland's eastern border, supplies have been significantly restricted. The reduction in resources due to the discontinuation of imports from the east has also been the cause of the increase in the prices of wood raw materials destined for biomass. The import of pellets from Ukraine is of great importance to Poland. Our country was the largest importer of this product—in 2021 we imported a total of 121,000 tonnes from Ukraine, which accounted for nearly 30% of all Ukrainian exports (412,000 tonnes). Considering that the volume of pellet production oscillates around 1 million tonnes, this is quite a serious loss [114].

## 5. Conclusions

Wood prices show a significant upward trend over time, both in terms of direction and the broad amplitude of change. The verifiable temporal distribution was used to analyse the overall price volatility of wood raw material. The practical aspect of the results of the research consisted in identifying seasonal fluctuations for small- and medium-sized wood assortments as factors influencing the situation on the wood market.

Strong deviations in the predicted price levels occurring over short time periods (1–2 quarters) are often caused by random events that are difficult to identify. In the time period studied (2018–2023), irregular fluctuations in the predicted price changes for small- and medium-sized assortments constituted a small part of the analysed data. The local character of the occurrence of random distortions did not have a significant impact on the price of these assortments.

Seasonal fluctuations in the prices of S2A, M2, M2 ZE, and S4 wood occurring over the period of one year are related to seasons, weather conditions, climate change, and seasonality in the sourcing of wood and demand for wood. The S4 assortment (firewood) displayed seasonality too. Its price increased in Q4 of each year. No seasonality was observed for other assortments. Price patterns depend on the assortment of wood; the lowest predicted price increase value was observed for the M2 assortment, while the highest value was observed for the SZAP assortments. The supply of hardwood was the highest in Q1 and lowest in Q3.

The analysis of the overall price volatility and wood supply enables the application of ARIMA models for the forecasting of wood prices and planning the amounts of wood to be sourced in longer time periods, as well as for the adjustment of the wood assortment structure to the changes in market demand.

Long-term price fluctuations displayed a minor upward trend, while the predicted price of wood over the last 2 years was distinguished by a clearer upward tendency, which continued over the forecasting period (the percentage increase in the prices of M2ZE and SZAP assortments amounted to 45% and 17%, respectively). In the long term, the growing demand for medium-sized wood will cause a rise in prices as a result of oversupply.

Price forecasting is the result of complex mechanisms. The ARIMA model captures past market behaviour using a single data series. This low data requirement is a strength of the ARIMA approach in a forecasting situation with many unknowns.

The weakness of the model is its reliance on a single time series of prices from forecasting. It does not allow for the inclusion of future changes caused by exogenous factors: transportation prices, trade restrictions, natural disasters, etc.

Forecasts are useful for creating a short-term forecast, one or two quarters; for use beyond this period, other methods are needed that take into account exogenous factors.

Due to the large number of exogenous factors affecting the forecast of wood prices in Poland, the analysis is difficult. In the case of natural disasters, the political and economic situation in Poland, the authors assumed in their study that the price includes this information. This also applies to the level of inflation in the country. In their further plans, the authors want to attempt to expand the forecasting model with external factors influencing the determination of the level of wood prices in Poland.

**Author Contributions:** Conceptualisation, A.G. and K.A.; methodology, A.G.; software, A.S.-B.; validation, K.A., Z.S. and M.W.; formal analysis, Z.S.; investigation, A.G.; resources, A.G.; data curation, M.W.; writing—original draft preparation, A.G.; writing—review and editing, M.W.; visualisation, A.S.-B.; supervision, K.A.; project administration, M.W.; funding acquisition, K.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the National Centre for Research and Development, BIOC-TRATEC3/344303/14/NCBR/201 and POIR 01.01-00-802/19. Publication was financed within the framework of the Polish Ministry of Science and Higher Education's program: "Regional Excellence Initiative" in the years 2019–2022, project no. 005/RID/2018/19, financing amount 1,200,000,000 PLN.

**Data Availability Statement:** Not applicable.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

- Lundholm, A.; Corrigan, E.; Nieuwenhuis, M. Implementing Climate Change and Associated Future Timber Price Trends in a Decision Support System Designed for Irish Forest Management and Applied to Ireland's Western Peatland Forests. *Forests* **2019**, *10*, 270. [CrossRef]
- Hetemäki, L.; Hänninen, R.; Toppinen, A. Short-Term Forecasting Models for the Finnish Forest Sector: Lumber Exports and Sawlog Demand. *Forests* **2019**, *10*, 990. [CrossRef]
- Hetemäki, L.; Mikkola, J. Forecasting Germany's Printing and Writing Paper Imports. *For. Sci.* **2005**, *51*, 483–497. [CrossRef]
- Tzanova, P. Time Series Analysis for Short-Term Forest Sector Market Forecasting. *Austrian J. For. Sci.* **2017**, *134*, 2005–2230.
- Hlavackova, P.; Brezina, D.; Sujova, A. The Price Formation of Raw Wood in the Czech Republic and a Comparison with the Neighbor States. *Procedia Econ. Financ.* **2015**, *26*, 389–395. [CrossRef]
- European Green Deal: Commission Proposes Transformation of EU Economy and Society to Meet Climate Ambitions Brussels. 14 July 2021. Available online: [https://transport.ec.europa.eu/news/european-green-deal-commission-proposes-transformation-eu-economy-and-society-meet-climate-ambitions-2021-07-14\\_en](https://transport.ec.europa.eu/news/european-green-deal-commission-proposes-transformation-eu-economy-and-society-meet-climate-ambitions-2021-07-14_en) (accessed on 12 November 2022).
- Kostadinov, F.; Holm, S.; Steubing, B.; Thees, O.; Lemm, R. Simulation of a Swiss wood fuel and rundwood market: An explorative study in agent-based modeling. *For. Policy Econ.* **2014**, *38*, 105–118. [CrossRef]
- Kozuch, A.; Adamowicz, K. Wpływ kosztów realizacji pozaprodukcyjnych funkcji lasu na sytuację ekonomiczną nadleśnictw Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Krakowie. *Sylvan* **2016**, *160*, 1010–1019. [CrossRef]
- Niemelä, J.; Young, J.; Alard, D.; Askasibar, M.; Henle, K.; Johnson, R.; Kurttila, M.; Larsson, T.-B.; Matouch, S.; Nowicki, P.; et al. Identifying, managing and monitoring conflicts between forest biodiversity conservation and other human interests in Europe. *For. Policy Econ.* **2005**, *7*, 877–890. [CrossRef]
- Alberdi, I.; Michalak, R.; Fischer, C.; Gasparini, P.; Brändli, U.-B.; Tomter, S.M.; Kuliesis, A.; Snorrason, A.; Redmond, J.; Hernández, L.; et al. Towards harmonized assessment of European forest availability for wood supply in Europe. *For. Policy Econ.* **2016**, *70*, 20–29. [CrossRef]
- O'Donnell, A.; Cummins, M.; Byrne, K.A. Forestry in the Republic of Ireland: Government policy, grant incentives and carbon 653 sequestration value. *Land Use Policy* **2013**, *35*, 16–23. [CrossRef]
- Adamowicz, K. Cenowa elastyczność popytu na drewno na pierwotnym lokalnym rynku drzewnym w Polsce. *Sylvan* **2010**, *154*, 130–138. [CrossRef]
- Gejdoš, M.; Daníhelová, Z. Valuation and Timber Market in the Slovak Republic. *Procedia Econ. Financ.* **2015**, *34*, 697–703. [CrossRef]
- Wysocka-Fiorek, E.; Lachowicz, H. Changes in prices, volume and value of wood raw material sold by the State Forests. *Sylvan* **2018**, *162*, 12–21. [CrossRef]
- Malinen, J.; Kilpeläinen, H. Price systems for standing sales of industrial roundwood in Finland. *Balt. For.* **2013**, *19*, 307–315.
- Malinen, J.; Haring, M.; Kilpeläinen, H.; Verkasalo, E. Comparison of alternative roundwood pricing systems—A simulation approach. *Silva Fenn.* **2015**, *49*, 13. [CrossRef]
- Central Statistical Office. *Forestry Statistical Yearbook 2021*; Central Statistical Office: Warszawa, Poland, 2021. Available online: [https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5515/13/4/1/rocznik\\_statystyczny\\_lesnictwa\\_2021.pdf](https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5515/13/4/1/rocznik_statystyczny_lesnictwa_2021.pdf) (accessed on 2 November 2022).
- Directorate-General of State Forests. *Forests in Poland*; State Forest Information Center: Warszawa, Poland, 2018.
- Directorate-General of State Forests. *The State Forests in Numbers 2018*; State Forest Information Center: Warszawa, Poland, 2018. Available online: <https://www.lasy.gov.pl/pl/informacje/publikacje/do-poczytania/lasy-panstwowe-w-liczbach-1/lasy-panstwowe-w-liczbach-2018.pdf/@download/file/Lasy%20Pa%C5%84stwowe%20w%20liczbach%202018.pdf> (accessed on 2 November 2022).
- Zarządzenie Nr 68 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z Dnia 18 Listopada 2019 r. w Sprawie Prowadzenia Sprzedaży Drewna w Państwowym Gospodarstwie Lesnym Lasów Państwowych. (OM-906-1-107/05); State Forest Information Center: Warszawa, Poland, 2005.

21. Zarządzenie Nr 51 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z Dnia 16 Sierpnia 2005 r. Zmieniające Zarządzenie Nr 91 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych, z Dnia 30 Listopada 2001 r, Znak PA-80-121/2001, w Sprawie Prowadzenia Sprzedaży Drewna w Państwowym Gospodarstwie Lesnym Lasy Państwowe; (OM-906-1-107/05); State Forest Information Center: Warszawa, Poland, 2005.
22. Zarządzenie nr 46 Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych z Dnia 24 Października 2016r. w Sprawie Sprzedaży Drewna Prowadzonej Przez Państwowe Gospodarstwo Lesne Lasy Państwowe; (ZM.800.2.2016); State Forest Information Center: Warszawa, Poland, 2016.
23. Adamowicz, K. Ocena wpływu zmian gospodarczych na ilościowe zmiany podaży surowca drzewnego. *Zarządzanie Ochr. Przyr. Lasach* **2011**, *5*, 189–200.
24. Leskinen, P.; Kangas, J. Modelling Future Timber Price Development by Using Expert Judgments and Time Series Analysis. *Silva Fenn.* **2001**, *35*, 93–102. [[CrossRef](#)]
25. Szramka, H.; Bieniaszewski, T.; Auguscik, E.; Bobek, J.; Adamowicz, K. Wpływ wad drewna wielkowymiarowego na przychody z jego sprzedaży. *Sylvan* **2017**, *161*, 238–246. [[CrossRef](#)]
26. Suchodolski, P.; Idzik, M. Identyfikacja i ocena zmienności cen drewna w nadlesnictwie Płock. *Wiadomości Stat.* **2018**, *11*, 41–55.
27. Borzykowski, N. A supply-demand modeling of the Swiss roundwood market: Actors responsiveness and CO<sub>2</sub> implications. *For. Policy Econ.* **2019**, *102*, 100–113. [[CrossRef](#)]
28. Holm, S.; Hilty, L.M.; Lemm, R.; Thees, O. Empirical validation of an agent-based model of wood markets in Switzerland. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0190605. [[CrossRef](#)]
29. Knauf, M. An Analysis of Wood Market Balance Modeling in Germany. *For. Policy Con.* **2015**, *50*, 319–326. [[CrossRef](#)]
30. Koskela, E.; Ollikainen, M. A game-theoretic model of timber prices with capital stock: An empirical application to the Finnish pulp and paper industry. *Can. J. For. Res.* **1998**, *28*, 1481–1493. [[CrossRef](#)]
31. Lachowicz, H.; Wysocka-Pijorek, E. Silver birch timber market in Poland in 2008–2012. *Sylvan* **2016**, *160*, 971–980. [[CrossRef](#)]
32. Olsson, O.; Hillring, B. Price relationships and market integration in the Swedish wood fuel market. *Biomass Bioenergy* **2013**, *57*, 78–85. [[CrossRef](#)]
33. Paschalis–Jakubowicz, P.; Kulik, P.; Lachowicz, H. Obrót surowcem drzewnym najwyższych klas jakości w Polsce. *Sylvan* **2015**, *159*, 91–102. [[CrossRef](#)]
34. Prestemon, J.P.; Holmes, T.P. Timber price dynamics following a natural catastrophe. *Am. J. Agric. Econ.* **2000**, *82*, 145–160. [[CrossRef](#)]
35. Zając, S. Analiza ekonometryczna i prognozowanie zjawisk i procesów rynku surowca drzewnego w Polsce. *Pr. IBL. Ser. A* **1999**, *886*, 1–133. [[CrossRef](#)]
36. Penttinen, M.J. Impact of stochastic price and growth processes on optimal rotation age. *Eur. J. Forest Res.* **2006**, *125*, 335–343. [[CrossRef](#)]
37. Khajuria, R.P.; Kant, S.; Laaksonen-Craig, S. Modeling of timber harvesting options using timber prices as a mean reverting process with stochastic trend. *Can. J. For. Res.* **2011**, *42*, 179–189. [[CrossRef](#)]
38. Gonzalez-Gomez, M.; Bergen, V. Berücksichtigung der Nichtstationarität von Zeitreihen bei empirischen Untersuchungen des deutschen Rohholzmarktes. *Allg. Forst J.-Ztg* **2014**, *186*, 53–62.
39. Kolo, H.; Tzanova, P. Forecasting the German forest products trade: A vector error correction model. *JFE* **2017**, *26*, 30–45. [[CrossRef](#)]
40. Buongiorno, J. Global modelling to predict timber production and prices: The GFPM approach. *Forestry* **2015**, *88*, 291–303. [[CrossRef](#)]
41. Gejdoš, M.; Lieskovský, M.; Giertliová, B.; Němec, M.; Danihelová, Z. Prices of Raw-Wood Assortments in Selected Markets of Central Europe and their Development in the Future. *Bioresources* **2019**, *14*, 2995–3011. [[CrossRef](#)]
42. Toppinen, A.; Kuuluvainen, J. Forest sector modelling in Europe—The state of the art and future research directions. *For. Policy Econ.* **2010**, *12*, 2–8. [[CrossRef](#)]
43. National Bank of Poland. Exchange Rate of the Polish National Bank. Available online: <https://www.nbp.pl/home.aspx?f=/statystyka/kursy.html> (accessed on 4 August 2022).
44. Central Statistical Office. Inflation Coefficients in Poland. Available online: <https://stat.gov.pl/obszarytematyczne/ceny-handel/wskazniki-cen/wskazniki-cen-towarow-i-uslug-konsumpcyjnych-pot-inflacja-/miesieczne-wskazniki-cen-towarow-i-uslug-konsumpcyjnych-od-1982-roku/> (accessed on 4 August 2022).
45. Shiskin, J.; Young, A.H.; Musgrave, J.C. *The X-11 Variant of the Census Method II Seasonal Adjustment Program*; Technical Paper 15; US Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1967.
46. Hodrick, R.; Prescott, E.C.; Postwar, U.S. Business Cycles: An Empirical Investigation. *J. Money Credit Bank.* **1997**, *29*, 1–16. Available online: <http://www.jstor.org/stable/2953682?origin=JSTOR-pdf> (accessed on 13 November 2022). [[CrossRef](#)]
47. Leskinen, P.; Kangas, J. Modelling and simulation of timber prices for forest planning calculations. *Scand. J. For. Res.* **1998**, *13*, 469–476. [[CrossRef](#)]
48. Michinaka, T.; Kuboyama, H.; Tamura, K.; Oka, H.; Yamamoto, N. Forecasting Monthly Prices of Japanese Logs. *Forests* **2016**, *7*, 94. [[CrossRef](#)]
49. Prestemon, J.P. Evaluation of U.S. southern pine stumpage market informational efficiency. *Can. J. For. Res.* **2003**, *33*, 561–572. [[CrossRef](#)]
50. Zhou, M.; Buongiorno, J. Space-Time Modeling of Timber Prices. *J. Agric. Resour. Econ.* **2006**, *31*, 40–56. Available online: <https://www.jstor.org/stabilny/40987305> (accessed on 13 November 2022).

51. Malaty, R.; Toppinen, A.; Viitanen, J. Modelling and forecasting Finnish pine sawlog stumpage prices using alternative time-series methods. *Can. J. For. Res.* **2006**, *37*, 178–187. [CrossRef]
52. Bolkesjo, T.F. Projecting pulpwood prices under different assumptions on future capacities in the pulp and paper industry. *Silva Fenn.* **2005**, *39*, 103–116. [CrossRef]
53. Dahal, P.; Mehmood, S. Determinants of timber bid prices in Arkansas. *For. Prod. J.* **2005**, *55*, 89–94.
54. Kallio, A. Analysing the Finnish pulpwood market under alternative hypotheses of competition. *Can. J. For. Res.* **2011**, *31*, 236–245. [CrossRef]
55. Sun, C.; Zhang, D. Assessing the Financial Performance of Forestry Related Investment Vehicles: Capital Asset Pricing Model vs. Arbitrage Pricing Theory. *Am. J. Agric. Econ.* **2001**, *83*, 617–628. Available online: <https://www.jstor.org/stabilny/1245091> (accessed on 13 November 2022). [CrossRef]
56. Kagalwala, A. kpsstest: A command that implements the Kwiatkowski, Phillips, Schmidt, and Shin test with sample-specific critical values and reports p-values. *Stata J.* **2022**, *22*, 269–292. [CrossRef]
57. Ning, Z.; Sun, C. Vertical price transmission in timber and lumber markets. *J. For. Econ.* **2014**, *20*, 17–32. [CrossRef]
58. Klepacka, A.M.; Siry, J.P.; Bettinger, P. Stumpage prices: A review of influential factors. *Int. For. Rev.* **2017**, *19*, 158–169. [CrossRef]
59. da Silva, B.K.; Schon, S.Z.; Cubbage, F.W.; Parajuli, R. Spatial and cross-product price linkages in the Brazilian pine timber markets. *For. Pol. Econ.* **2020**, *17*, 102186. [CrossRef]
60. Gan, J.; Tian, N.; Choi, J.; Pelkki, M.H. Synchronized movement between US lumber futures and southern pine sawtimber prices and COVID-19 impacts. *Can. J. For. Res.* **2022**, *52*, 614–621. [CrossRef]
61. Fuhrmann, M.; Dißauer, C.; Strasser, C.; Schmid, E. Analysing price cointegration of sawmill by-products in the forest-based sector in Austria. *For. Policy Econ.* **2021**, *131*, 102560. [CrossRef]
62. Broz, D.R.; Viego, V.N. Forecasting Prices of Manufactured *Pinus* spp. Using ARIMA Models. *Maulera Bosques* **2014**, *20*, 37–46. Available online: <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n1/v20n1a4.pdf> (accessed on 4 August 2022). [CrossRef]
63. Koutroumanidis, T.; Ioannou, K.; Arabatzis, G. Predicting fuelwood prices in Greece with the use of ARIMA models, artificial neural networks and a hybrid ARIMA-ANN model. *Energy Policy* **2009**, *37*, 3627–3634. [CrossRef]
64. Soares, N.S.; da Silva, M.L.; de Rezende, J.L.P.; de Lima, J.E.; de Carvalho, K.H.A. *Eucalyptus* spp. wood price forecasting model. *Cerne* **2010**, *16*, 041–052.
65. Yin, R. Forecasting short-term timber prices with univariate ARIMA models. *South. J. Appl. For.* **1999**, *23*, 53–58. [CrossRef]
66. Palander, T.; Vesa, L. Data-Driven Optimization of Forestry and Wood Procurement toward Carbon-Neutral Logistics of Forest Industry. *Forests* **2022**, *13*, 759. [CrossRef]
67. Buratto, D.A.; Junior, R.T.; Silva, J.C.G.L.; Frega, J.R.; Wiecheteck, M.S.S.A.; Silva, C.A. Use of artificial neural networks and ARIMA for forecasting consumption sawnwood of *Pinus* sp. in Brazil. *Int. For. Rev.* **2019**, *21*, 51–61. [CrossRef]
68. de Almeida, A.N.; de Souza, V.S.; de Loyola, C.E.; Bittencourt, M.V.L.; da Silva, J.C.G.L. Parana's plywood external price analysis using the Box & Jenkins methodology. *Sci. For.* **2009**, *37*, 61–69.
69. Reichert, B.; Souza, A.M. Forecast and interactions of the Brazilian cellulose prices in the internal and external markets. *Ciênc. Florest.* **2020**, *30*, 501–515. [CrossRef]
70. Cordeiro, S.A.; Soares, N.S.; Braga, M.J.; da Silva, M.L. Export price forecast of Brazilian pine sawn wood. *Sci. For.* **2010**, *38*, 205–214.
71. Soares, N.S.; da Silva, M.L.; de Lima, J.E.; Cordeiro, S.A. Analysis of forecasting the price of natural rubber in Brazil. *Sci. For.* **2008**, *36*, 285–294.
72. Lim, J.H.; Kim, Y.K.; Min, S.H.; Kim, S.W.; Lee, Y.H.; Lee, J.M. Seasonal Trends of Viral Prevalence and Incidence of Kawasaki Disease: A Korea Public Health Data Analysis. *J. Clin. Med.* **2021**, *10*, 3301. [CrossRef] [PubMed]
73. Jiang, S.; Yang, C.; Guo, J.; Ding, Z. ARIMA forecasting of China's coal consumption, price and investment by 2030. *Energy Sources* **2018**, *13*, 190–195. [CrossRef]
74. Wang, M.; Pan, J.; Li, X.; Li, M.; Liu, Z.; Zhao, Q.; Wang, Y. ARIMA and ARIMA-ERNN models for prediction of pertussis incidence in mainland China from 2004 to 2021. *BMC Public Health* **2022**, *22*, 1447. [CrossRef] [PubMed]
75. Ilie, O.D.; Ciobica, A.; Doroftei, B. Testing the Accuracy of the ARIMA Models in Forecasting the Spreading of COVID-19 and the Associated Mortality Rate. *Medicina* **2020**, *56*, 566. [CrossRef] [PubMed]
76. Doroftei, B.; Ilie, O.D.; Anton, N.; Timofte, S.I.; Ilea, C. Mathematical Modeling to Predict COVID-19 Infection and Vaccination Trends. *J. Clin. Med.* **2022**, *11*, 1737. [CrossRef]
77. Giglio, N.; Lasalvia, P.; Pawaskar, M.; Parellada, C.I.; Rojas, Y.G.; Micone, P.; Neyro, S.E. Trends in Varicella Burden of Disease Following Introduction of Routine Childhood Varicella Vaccination in Argentina: A 12-Year Time Series Analysis. *Vaccines* **2022**, *10*, 1151. [CrossRef]
78. Lim, J.H.; Kim, Y.K.; Min, S.H.; Kim, S.W.; Lee, Y.H.; Lee, J.M. Epidemiology and viral etiology of pediatric immune thrombocytopenia through Korean public health data analysis. *J. Clin. Med.* **2021**, *10*, 1356. [CrossRef]
79. Tian, N.; Zheng, J.X.; Guo, Z.Y.; Li, L.H.; Xia, S.; Lv, S.; Zhou, X.N. Dengue Incidence Trends and Its Burden in Major Endemic Regions from 1990 to 2019. *Trop. Med. Infect. Dis.* **2022**, *7*, 180. [CrossRef]
80. Li, S.; Li, R. Comparison of forecasting energy consumption in Shandong, China Using the ARIMA model, GM model, and ARIMA-GM model. *Sustainability* **2017**, *9*, 1181. [CrossRef]



81. Xu, Y.Q.; Xu, G.X.; An, Z.L.; Liu, Y.B. EPSTO-ARIMA: Electric Power Stochastic Optimization Predicting Based on ARIMA. In Proceedings of the IEEE 9th International Conference on Smart City and Informatization, Shenyang, China, 20–22 October 2021; pp. 70–75.
82. bin Shabri, M.A.; Samsudin, R.; Ilman, A.B. Recent Trends in Information and Communication Technology. *Book Ser. Lect. Notes Data Eng. Commun. Technol.* **2018**, *5*, 449–458. [CrossRef]
83. Shahriar, S.A.; Kayes, I.; Hasan, K.; Hasan, M.; Islam, R.; Awang, N.R.; Salam, M.A. Potential of Arima-ann, Arima-SVM, dt and catboost for atmospheric PM2.5 forecasting in bangladesh. *Atmosphere* **2021**, *12*, 100. [CrossRef]
84. Mehedintu, A.; Sterpu, M.; Soava, G. Estimation and Forecasts for the Share of Renewable Energy Consumption in Final Energy Consumption by 2020 in the European Union. *Sustainability* **2018**, *10*, 1515. [CrossRef]
85. Alquraish, M.; Ali Abuhasel, K.S.; Alqahtani, A.; Khadr, M. SFI-Based Hybrid Hidden Markov-GA, ARIMA-GA, and ARIMA-GA-ANN Models for Meteorological Drought Forecasting. *Sustainability* **2021**, *13*, 12576. [CrossRef]
86. Li, S.; Yang, X.; Li, R. Forecasting China's coal power installed capacity: A comparison of MGM, ARIMA, GM-ARIMA, and NMGCM models. *Sustainability* **2018**, *10*, 506. [CrossRef]
87. Jiang, F.; Yang, X.; Li, S. Comparison of forecasting India's energy demand using an MGM, ARIMA model, MGM-ARIMA model, and BP neural network model. *Sustainability* **2018**, *10*, 2225. [CrossRef]
88. Li, S.; Yang, X.; Li, R. Forecasting coal consumption in India by 2030: Using linear modified linear (MGM-ARIMA) and linear modified nonlinear (BP-ARIMA) combined models. *Sustainability* **2019**, *11*, 695. [CrossRef]
89. Musarat, M.A.; Alaloul, W.S.; Rabbani, M.B.A.; Ali, M.; Altaf, M.; Fediuk, R.; Farooq, W. Kabul river flow prediction using automated ARIMA forecasting: A machine learning approach. *Sustainability* **2021**, *13*, 10720. [CrossRef]
90. Wang, H.; Huang, J.; Zhou, H.; Zhao, L.; Yuan, Y. An integrated variational mode decomposition and arima model to forecast air temperature. *Sustainability* **2019**, *11*, 4018. [CrossRef]
91. Hussin, N.H.; Yusof, F.; Jamaludin, A.R.; Norrulashikin, S.M. Forecasting Wind Speed in Peninsular Malaysia: An Application of ARIMA and ARIMA-GARCH Models. *Pertanika J. Sci. Technol.* **2021**, *29*, 31–58. [CrossRef]
92. Zhang, X.C.; Zhou, Q.C.; Weng, S.J.; Zhang, H. ARIMA Model-Based Fire Rescue Prediction. *Hindawi Volume* **2021**, *2021*, 3212138. [CrossRef]
93. Yenidogan, I.; Cayir, A.; Kozan, O.; Dag, T.; Arslan, C. Bitcoin Forecasting Using ARIMA and PROPHET. In Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 20–23 September 2018; pp. 621–624. [CrossRef]
94. Sapsford, D.; Varoufakis, Y. An ARIMA Analysis of Tea Prices. *J. Agric. Econ.* **1987**, *38*, 329–334. [CrossRef]
95. Fattah, J.; Ezzine, L.; Aman, Z.; El Moussami, H.; Lachhab, A. Forecasting of demand using ARIMA model. *Int. J. Eng. Business Manag.* **2018**, *10*, 1847979018808673. [CrossRef]
96. Simanov, V. Fuel, or Assortment for Energy Use? 2009. Available online: [https://biom.cz/upload/9982d8381d3da848a8072e06cf966ec87/CZ\\_Biom\\_Biomasa\\_a\\_Energetika\\_2009\\_Sbornik.pdf](https://biom.cz/upload/9982d8381d3da848a8072e06cf966ec87/CZ_Biom_Biomasa_a_Energetika_2009_Sbornik.pdf) (accessed on 27 July 2022).
97. Němec, M.; Dado, M.; Danihelová, Z. Document A study on occupational noise exposure of sawmill workers. *Akustika* **2014**, *21*, 31–34.
98. Mehrotra, S.N.; Kant, S.; Majumdar, I. Industry Cycles in the US Softwood Lumber Industry: 1985 through 2010. *For. Prod. J.* **2014**, *64*, 116–125. [CrossRef]
99. Petersen, B.; Strongin, S. Why are some industries more cyclical than others? *J. Bus. Econ. Stat.* **1996**, *14*, 189–198.
100. Wear, D.N.; Prestemon, J.P.; Foster, M.O. US Forest Products in the Global Economy. *J. For.* **2016**, *114*, 483–493. [CrossRef]
101. Riddle, A. COVID-19 and the US Timber Industry (Updated 29 July 2021); Congressional Research Service: Washington, DC, USA, 2021.
102. Toppinen, A.; Kuuluvainen, J. Structural changes in sawlog and pulpwood markets in Finland. *Scand. J. Forest Res.* **1997**, *12*, 382–389. [CrossRef]
103. Solberg, B. *An Econometric Analysis of Timber Supply in Eight Northwestern European Countries*; EFI Technical Report No. 44; European Forest Institute: Joensuu, Finland, 2011; Available online: <https://efi.int/publicationsbank/econometric-analysis-timber-supply-eight-northwestern-european-countries> (accessed on 4 August 2022).
104. Tian, N.; Poudyal, N.C.; Augé, R.M.; Hodges, D.G.; Young, T.M. Meta-Analysis of Price Responsiveness of Timber Supply. *For. Prod. J.* **2017**, *67*, 152–163. [CrossRef]
105. Kozuch, A.; Banaś, J. The Dynamics of Beech Roundwood Prices in Selected Central European Markets. *Forests* **2020**, *11*, 902. [CrossRef]
106. Polyakov, M.; Wear, D.N.; Huggett, R.N. Harvest Choice and Timber Supply Models for Forest Forecasting. *For. Sci.* **2010**, *56*, 344–355. [CrossRef]
107. Zwirgmaier, K. Seasonality of Prices—The Example of German Timber Prices. Technische Universität München 2010. Available online: [http://www.gipecofor.org/doc/drupal/liens\\_article/evenements/2010/ZWIRGLMAIER\\_JUFRO\\_Paris\\_Mai2010.pdf](http://www.gipecofor.org/doc/drupal/liens_article/evenements/2010/ZWIRGLMAIER_JUFRO_Paris_Mai2010.pdf) (accessed on 4 August 2022).
108. Ghosh, S. Forecasting of demand using ARIMA model. *Am. J. Appl. Math. Comput.* **2020**, *1*, 11–18. [CrossRef]
109. Hýšek, Š.; Löwe, R.; Turčáni, M. What Happens to Wood after a Tree Is Attacked by a Bark Beetle? *Forests* **2021**, *12*, 1163. [CrossRef]

110. Górna, A. Wpływ klęsk żywiołowych na cenę surowca drzewnego w Polsce. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar.* **2021**, *20*, 161–165. [CrossRef]
111. Sikora, A.T. The effect of natural disasters on the timber market. *For. Res. Papers* **2017**, *78*, 277–284. [CrossRef]
112. Kuboyama, H.; Tachibana, S. Statistical analysis on price trend of softwood roundwood. *Kanto J. For. Res* **2014**, *65*, 9–12.
113. Fernández-Fernández, M.; Naves, P.; Musolin, D.L.; Selikhovkin, A.V.; Cleary, M.; Chira, D.; Paraschiv, M.; Gordon, T.; Solla, A.; Papazova-Anakieva, I.; et al. Pine Pitch Canker and Insects: Regional Risks, Environmental Regulation, and Practical Management Options. *Forests* **2019**, *10*, 649. [CrossRef]
114. Pellet Market in Europe after Pressure of War in Ukraine. Available online: <https://www.drewno.pl/artykuly/12552,rynek-peletu-w-europie-po-presja-wojny-na-ukrainie.html> (accessed on 29 November 2022).

5. Górna A., Szabelska-Beręsewicz A., Wieruszewski M., Starosta-Grała M., **Stanula Z.**, Kożuch A., Adamowicz K. Predicting post-production biomass prices. *Energies*. 2023, vol. 16 (issue 8), art. no. 3470, DOI: 10.3390/en16083470 (#5)

Article

## Predicting Post-Production Biomass Prices

Aleksandra Górna <sup>1,\*</sup>, Alicja Szabelska-Beręsewicz <sup>2</sup>, Marek Wieruszewski <sup>3</sup>, Monika Starosta-Grała <sup>1</sup>, Zygmunt Stanula <sup>1</sup>, Anna Kożuch <sup>4,\*</sup> and Krzysztof Adamowicz <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Forestry Economics and Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland; krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl (K.A.)

<sup>2</sup> Department of Mathematical and Statistical Methods, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland

<sup>3</sup> Department Mechanical Wood Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland

<sup>4</sup> Department of Forest Resources Management, Faculty of Forestry, University of Agriculture in Krakow, Al. 29-Listopada 46, 31-425 Krakow, Poland

\* Correspondence: aleksandra.gorna@up.poznan.pl (A.G.); a.janusz@ur.krakow.pl (A.K.)

**Abstract:** This paper presents the application of prediction in the analysis of market price volatility in Polish conditions of wood processing by-products in the form of biomass. The ARIMA model, which takes into account cyclical, seasonal, irregular fluctuations of historical data on the basis of which the forecast and long-term trends of selected wood products were made, was used in predicting prices. Comparisons were made between the ARIMA prediction method and the multiplicative Winters–Holt model. During the period studied (2017–2022), the changes in the market price of biomass were characterized by a wide spread of values. On average, the price of these products increased from 2017 to the end of 2022 by 125%. The price prediction analysis showed seasonal fluctuations in the case of wood chips. The uncertainty in price prediction is due to changes in supply resulting from the influence of global factors. The Diebold–Mariano test of matching accuracy confirms that the price prediction of the analyzed by-product sorts using the ARIMA and WH models is possible. The conclusion reached by comparing these two methods is that each can be used under certain market conditions of certain assortments. In the case of a stable wood product, the choice of the ARIMA model should be resolved, while in the case of price volatile products, WH will be a better choice. The difference between the predicted and actual price with ARIMA ranged from 2.4% to 11.6% and for WH from 3.7% to 29.8%.

**Keywords:** timber market; wood biomass prices; prediction; seasonality of supply; cyclicity; woodchips; sawdust; bark; ARIMA; Winters–Holt



**Citation:** Górna, A.; Szabelska-Beręsewicz, A.; Wieruszewski, M.; Starosta-Grała, M.; Stanula, Z.; Kożuch, A.; Adamowicz, K. Predicting Post-Production Biomass Prices. *Energies* 2023, 16, 3470. <https://doi.org/10.3390/en16083470>

Academic Editor: Eliseu Monteiro

Received: 22 March 2023

Revised: 7 April 2023

Accepted: 11 April 2023

Published: 15 April 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### 1. Introduction

The management process of woody biomass resources seeks to increase the importance of reducing negative environmental impacts. This is influenced by the increasing importance of managing by-products in production processes, or the so-called waste [1–3]. The growing awareness of the negative consequences of the use of fossil raw materials use, which leads to the favorable view of renewable raw materials [4], increases the proportion of decisions and actions taken by producers and consumers who take into account environmental decision-making directions and ecological policies of biomass management. The result is an effort to maximize the use of raw materials and waste materials in the production process as well as the transition to “zero waste” [5–8]. Increased use of renewable raw materials tends to be the direction of wood-processing-related companies [9]. The timber industry is an example of an industry where the total utilization of wood raw material is possible. Due to the nature of processing, by-products are generated that are consumed in the original enterprise or processed in other branches of the industry. In practice, this

means the production of timber products existing alongside the potential for reuse and recycling in the generation of so-called waste or by-products [10]. Such opportunities and activities translate directly into economic and environmental benefits, influencing the formation of a neutral environment for the circulation of wood biomass [11]. Processing hard-to-reach post-disaster wood into biomass can be a good solution for preventing energy biomass shortages [12].

The largest processing potential in the timber industry is in the lumber industry. Wood processing generates both finished and by-products. By-products, due to their low processing and lack of chemical contamination, can be used for energy purposes. The goal of sawmill enterprises is to improve profitability with the stable use of raw material resources. It is important to be able to quickly adjust the product price to economic needs and market changes. The activities of wood-processing plants are based on making price evaluations adapted to demand, including in the area of supply of energy biomass. These activities are limited to providing access to by-products such as woodchips, sawdust and bark. The industry's management affects social goals, which is confirmed by the economic as well as environmental and social aspects [13].

Volatile economic conditions are increasing the pressure on financial management and the need to show high financial performance. According to positive accounting theory, increasing risk is associated with the phenomenon of earnings management manipulation. Central European companies manipulate earnings to a similar extent, with Slovak, Czech and Hungarian companies increasing accounting profit to a greater extent than Polish companies [14–16].

Under Polish market conditions, if the sawdust and woodchips in question meet the requirements of regulations, they can be qualified as a by-product. The concept of "by-product" was introduced in Article 5 of Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council No. 2008/98/EC on waste and repealing certain directives [17], hereinafter referred to as "Directive 2008/98/EC". The Polish legal provision of Article 10 of the Waste Act [18] has an analogous wording. In these definitions, a material or substance is given the status of a by-product if it is a material resulting from a production process, the primary purpose of which is not to produce it, but to further use the substance or such subjects, and these can be used directly without any further processing. It should be emphasized that a by-product is not waste, and therefore is not subject to the requirements of broadly defined "waste law". Sawdust and woodchips, which are generated as a residue of the production process, can be used both in production processes and in other processes (e.g., processed into wood products, directly burned, or processed into other solid and liquid fuels). This type of biomass, as well as its physical and chemical parameters, are included in the framework quality requirements of a given energy group or else are directly restricted in how the biomass can be used. The quality requirements for solid biomass have a common reference source, which is the European standard PN-EN 14961-1 [19,20].

Sawdust and shavings are generated by sawing and cutting wood. Their shape depends on the tools used. In practice, they are considered to be bulk materials that are a by-product of sawing roundwood in a wet state (moisture content above 30%) and processing sawn materials. The structure of shavings is practically the same as that of the processed material while, as a by-product, it has a varied shape structure [21].

An additional product of wood processing is bark, which consists of all tissues outside the vascular cambium cells. Wood bark is much thinner than the trunk's woody part. Under the conditions of roundwood processing, the bark is removed from the side of the trunk to reduce tool wear. The resulting product is used as an energy material and as a product in horticulture or panel material production [22].

The introduction of increased use of by-products contributes to reducing the consumption of wood as well as fossil fuels. Actions carried out by companies allow for the successive increase in the value of these products in the energy balance, as defined by the 2021–2030 goals of increasing the share of renewable energy in total energy consumption and increasing energy efficiency by at least 32% [23]. Therefore, it is advisable to address

this subject, especially given the narrow number of data from the literature and scientific studies on economic factors shaping the potential use of industrial woody biomass. Most of the studies are related to the use of forest biomass and verification of the prediction of price changes in forest biomass [24,25]. In order to effectively assess the sustainability of biomass utilization, it is necessary to carry out an analysis of raw material abundance and economic calculation of post-production biomass.

Given the urgent need to switch to low-carbon energy carriers, waste wood resources could provide an alternative energy resource and reduce emissions at the same time. Various species of waste wood find applications in energy processing using modern processing techniques. Energy from low-polluting processed wood waste will provide advantages over fossil fuels [26–28].

To analyze the economic potential of processed wood waste, the area of Poland and data on the price variability of biomass offered by sawmills, which are the first link of roundwood processing, were selected. This paper classifies price variability from the point of view of by-products that are the result of wood raw material processing.

The starting point for further analysis was a compilation of data on harvested and sold wood in Poland from 2010–2021 (Figure 1).

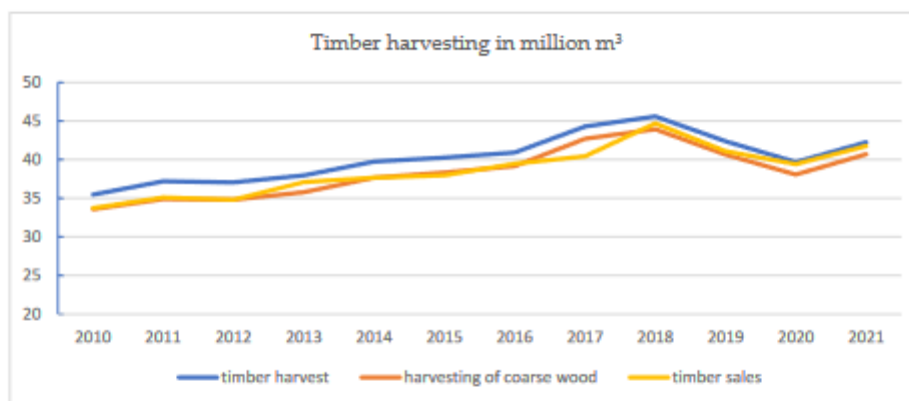


Figure 1. Timber harvest, sales, exports and imports from 2010–2021 [29–37].

Poland currently processes about 40 million m<sup>3</sup> of wood per year, of which sawmills process about 25 million m<sup>3</sup> [35]. The most popular and most processed wood raw material is pine. It accounts for about 61% of the processed raw material. The other species are as follows: spruce (6%), fir (4%), beech (7%), oak (6%), birch (5%) and others that account for a total of 11% [35]. Taking into account the volume of wood processing by sawmills, the destination for the resulting wood by-products of the so-called industrial wood biomass was indicated.

The profitability of processing wood by-products depends on a number of factors, including their quantity, form, market demand, transportation costs, external energy costs or the energy requirements of a given processing plant. The larger the sawmills, the greater the possibility of selling such by-products to, e.g., panel plants, or processing them into an energy product: pellets briquettes. In smaller sawmills, on the other hand, most often the by-product material is directly used for energy purposes. Thus, with the economic aspect in mind, it is important for further consideration to determine the demand of each group of sawmills. Using a model, it was possible to determine the processing structure of sawmills and indicate the amount of by-products they generate (Table 1) [29].

**Table 1.** Quantity of by-products from wood processing in sawmills in 2021.

Volume of Processing	Wood Consumption	By-Products					Bark (8%)	Total By-Products + Bark	Total By-Products + Bark Unit
		Total (40%)	Piecemeal Waste (30%)		Sawdust and Shavings (10%)	Other (12%)			
			Woodchips (18%)						
[thousand m <sup>3</sup> ]									
Total	16,515.75	6606.3	2573.1	2381.63	1651.58	1321.26	7927.56	1.30	

Source: Own elaboration [29,38].

Timber prices are not the primary criterion regulating the amount of timber available on the market [32], but they are important in optimizing sales planning [39,40]. Information on changes in timber prices is a source of knowledge used in planning the activities of timber enterprises. Therefore, analyses explaining the mechanisms of timber market formation, through changes in the prices of wood by-products over time, are the subject of many studies both in Poland and in other countries [41–53]. These prices are under pressure from numerous political, natural and market factors. The functioning of the primary timber market, as well as the market for by-products of wood processing, is considered using time series [54,55]. The use of appropriate prediction methods allows us to predict changes in timber product prices [56–61]. Currently, most studies focus on the analysis of changes or trends in time series and their role in predicting market prices [62].

The purpose of this study was to confirm the applicability of time series predictive models and determine the fit of statistical methods to price changes in the industrial waste biomass market. It was hypothesized that the use of ARIMA and WH models makes it possible to predict wood prices over variable time horizons and adjust the price structure of wood processing products in accordance with changes in market demand.

## 2. Materials and Methods

In a group of numerous by-products from mechanical wood processing, the basic sorts traded on the market were included. Woodchip materials were singled out as the most valuable group and further divided into paper and lumber chips. Another group of analyzed biomass was sawdust and shavings from sawmill rework. The last form of by-product of roundwood processing was pine bark, which finds its position in the market for energy biomass and the product that goes directly to the market as horticultural bark. Data on the prices of wood by-products were obtained by verifying direct market prices and the literature data [63,64].

In order to verify the validity of predictive method selection, the Diebold–Mariano test was conducted. First, data up to September 2022 were considered, where the test answered a question of whether the fit of both models used differed significantly from each other. ARIMA and the multiplicative Winters–Holt (WH) model were selected [65,66].

To verify the price of wood by-products (industrial biomass), a predictive methodology was used, which includes in its assumptions an integrated autoregressive model with a moving average (ARIMA). In order to use ARIMA ( $p, d, q$ ), the values of  $p$ ,  $d$  and  $q$  must be estimated. These parameters indicate the following:

$p$  is the autocorrelation parameter.

$d$  is the integration level of the series.

$q$  is the moving average parameter.

In general, ARIMA can be presented by the following Equation (1):

$$\varphi(B)\nabla^d z_t = \theta(B)a_t \text{ lub } z_t = \sum_{i=0}^p \varphi_i z_{t-1} + \alpha_t - \sum_{k=1}^q \theta_k a_{t-k} \quad (1)$$

where (2):

$$\varphi(B) = 1 - \varphi_1 B - \varphi_2 B^2 - \dots - \varphi_p B^p \quad (2)$$

We estimate the  $\varphi$  parameter to assess the impact of the previous value of the process on the current value (2).

This is a non-seasonal autoregressive parameter  $p$  (3).

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (3)$$

This is the non-seasonal moving average parameter  $q$  and the parameter  $B$  as a backward shift operator, which can be written as (4):

$$B^p Z_t = Z_{t-p} \quad (4)$$

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_p \dots$  and  $\theta_1, \theta_2, \theta_q$  are unknown coefficients that were estimated from sample data using approximate probabilities.

In the equation  $\nabla^d = (1 - B)^d$ ,  $d$  is a backward shift operator of order " $p$ ", i.e., defined as (5):

$$\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1} \text{ along with } \nabla^d = \nabla \nabla^{d-1} \quad (5)$$

It is adopted as the first step of calculation to check the data integration. That is, determining whether the data are stationary or whether it is possible to transform them into the nature of stationarity. When the developed data are stationary, a parameter  $d = 0$  is assumed, while when the data need to be transformed, the parameter  $d > 0$  is adopted. To determine the stationarity of data, the KPSS (Kwiatkowski–Phillips–Schmidt–Shin) test was used [67]. This test verifies the hypothesis of whether the process is stationary determining whether consideration of differences is needed. While conducting the study of stationarity, the raw data is first subjected to test. The amount of differentiation process of the data is carried out until the data is characterized by stationarity after the KPSS test.

To determine the remaining parameters  $p$  and  $q$ , the autocorrelation function (ACF) and partial autocorrelation function (PACF) are used. Based on the resulting histograms, it is possible to proceed to the identification of the autocorrelation parameter and moving average. By comparing the histograms, the levels of increase in the value of obtained data in the adopted periods are determined, as is the probable variant of the ARIMA model. The methodological assumptions were in line with the authors' previous research papers [20]. In the conducted study, variants of parameters  $p$ ,  $d$  and  $q$  were determined separately for each dataset of individual sorted groups.

In addition, a comparison was made with the Winters–Holt model. The WH is one of the prediction methods that uses exponential smoothing [68]. It involves the creation of an exponential smoothing moving average, the weights of which are determined according to the scheme that the older the data on the phenomenon under study, the smaller the value they present for a given prediction. Specific assumptions and equations are needed to develop the model.

Equation for random fluctuation estimation (6):

$$F_t = \alpha \times y_t + (1 - \alpha) \times (F_{t-1} + S_{t-1}) \quad (6)$$

where:

$F_t$ —random variations for each observation in the time series.

$y_t$ —observation value.

$F_{t-1}$ —random changes for the previous observation in the time series.

$S_{t-1}$ —estimated trend in the previous observation.

Equation for trend estimation (7):

$$S_t = \beta \times (F_t + F_{t-1}) + (1 - \beta) \times S_{t-1} \quad (7)$$

where  $\alpha$  and  $\beta$  are model parameters with values between 0 and 1.

In model development, it is necessary to calculate expired predictions (8), i.e., for the period in which the actual value has already materialized, and then actual predictions can be calculated for the future period (9).

Equation for expired prediction (8):

$$y_t^* = F_{t-1} + S_{t-1} \quad (8)$$

Equation for actual prediction (9):

$$y_t^* = F_n + (T - n) S_n \quad (9)$$

where:

$T = n + 1, n + 2, \dots$

$F_n$ —random variations for the last observation in the time series.

$S_n$ —estimated trend in the last observation.

$n$ —the number of observation.

The first values of  $F_1$  and  $S_1$  should be taken as:

$$F_1 = y_1$$

$$S_1 = 0$$

or

$$S_1 = y_2 - y_1$$

The next step in the analysis was to determine the correctness of the chosen methodology. Actual prices were compared with prediction prices.

R program version 4.2.0 of 2022 was the tool used to conduct the calculations.

The following equations were used: mean absolute error (MAE), mean absolute percent error (MAPE), and root-mean-square deviation (RMSE):

MAE (10):

$$\Delta x = |x - x_0| \quad (10)$$

where:

$x$ —real value of price

$x_0$ —prediction value of price

MAPE (11):

$$\delta = \frac{|x - x_0|}{x} * 100\% \quad (11)$$

RMSE (12):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |x - x_0|}{N}} \quad (12)$$

where  $N$  is the number of observation.

The final stage of study, using the Diebold–Mariano test, determined the accuracy of selected models for the October–December 2022 prediction period. This test answers the question of whether the difference in prediction efficiency is significant. The value for determining model fit and efficiency is the  $p$ -value, which is taken in advance at the level of 0.05.

In the prediction carried out, it should be noted that external factors such as inflation, economic crisis and historical prices have already been taken into account at the level of input data. The prediction also includes these factors in its data return value.

### 3. Results

Industrial biomass otherwise defined as a by-product of the technological process of wood processing is used most often for energy purposes or as a raw material for the

production of wood-based panels. Releasing this biomass for sale allows its market price to be determined. The following is a graph showing the changes in the price of wood by-products by month from 2017 to 2022.

Figure 2 shows the price changes for individual groups qualifying as by-products of roundwood processing. The largest price increase occurred for sawdust and shavings, while the smallest change was for paper chips. Between 2017 and 2022, the price of paper chips increased by about 108%; lumber chips by about 116%; pine bark by about 112%; while the largest price increase of almost 167% was recorded for sawdust and shavings.

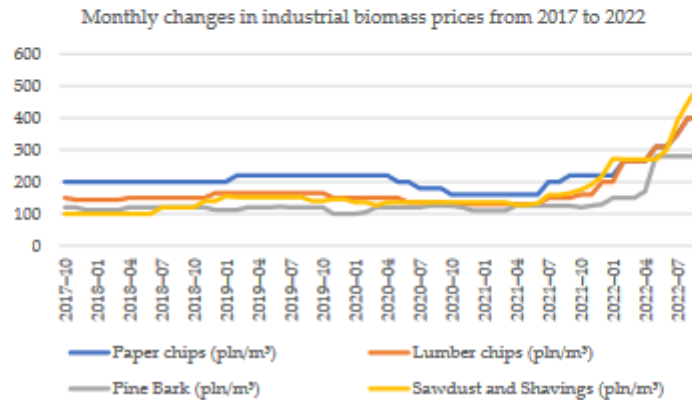


Figure 2. Monthly changes in industrial biomass prices from 2017 to 2022. Source: Own elaboration based on obtained data [33–38].

The Diebold–Mariano test was used to determine the fit of selected models. This test answers the question of whether the fit of both models used is significantly different from each other. In this case, it was hypothesized that WH has a better fit. Based on the results, it can be concluded that WH’s fit based on data only up to September 2022 is better (Table 2). However, it should be taken into account that, as a result, both methods can have an equally good fit.

Table 2. Diebold–Mariano test results of ARIMA and WH fit.

Sorting	p-Value	Program R Confirmation
Paper chips	0.002385	Confirmed
Lumber chips	0.01342	Confirmed
Pine bark	0.1213	Confirmed
Sawdust and shavings	0.000472	Confirmed

Source: Own elaboration based on obtained data.

After data analysis, the corresponding ARIMA variants were selected (Table 3).

Table 3. Selection of ARIMA variants for paper chips, lumber chips, pine bark, sawdust and shavings.

Sorting	Variant of Model ARIMA
Paper chips	2, 2, 0
Lumber chips	5, 2, 0
Pine bark	0, 1, 0
Sawdust and shavings	1, 2, 3

Source: Own elaboration based on obtained data.

### 3.1. Prediction for Paper Chips

Table 4 shows the values of the forecast using ARIMA and WH compared to the actual price. As you can see in the case of paper chips, better values are achieved when using WH. The smallest differences between the actual and forecast prices were recorded for the first month of forecasting (October). The biggest difference occurs for the last forecast month (December). The WH method gives better results in the short-term forecasting period (for one month prediction).

**Table 4.** Paper chip price prediction for October–December 2022.

	ARIMA		Winters–Holt
	Actual Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )
October 2022	400	444.27	426.25
November 2022	400	475.68	446.87
December 2022	370	491.78	463.93

Source: Own elaboration based on obtained data [33–38].

### 3.2. Prediction for Lumber Chips

Table 5 shows the predicted value for lumber chips. The use of WH gives smaller differences between the forecast and the actual price compared to ARIMA. The smallest errors were recorded in the first month of forecasting (October), and the largest for the last month (December). The WH method gives better results in the short-term forecasting period (for one month prediction).

**Table 5.** Lumber wood chip price prediction for October–December 2022.

	ARIMA		Winters–Holt
	Actual Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )
October 2022	400	446.56	414.87
November 2022	400	463.49	415.97
December 2022	350	480.41	454.12

Source: Own elaboration based on obtained data [33–38].

### 3.3. Prediction for Pine Bark

Table 6 shows the differences between the actual and forecast prices on the pine bark example. In this case, the constant difference in each month of forecasting was recorded using ARIMA and amounted to PLN 20/m<sup>3</sup>. With the WH method, the smallest difference was recorded in the second month of forecasting, and the largest in the third month of forecasting. The ARIMA method gives better results in the longest-term forecasting period (for three months prediction).

**Table 6.** Pine bark price prediction for the period from October–December 2022.

	ARIMA		Winters–Holt
	Actual Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )
October 2022	300	280	281.51
November 2022	300	280	271.45
December 2022	300	280	257.60

Source: Own elaboration based on obtained data [33–38].

### 3.4. Prediction for Sawdust and Shavings

In the case of sawdust (Table 7), the smallest differences between the actual and forecast prices were recorded for ARIMA for the two forecast months (October, November), while the

largest ones were observed in the third month of forecasting (December). WH had the smallest differences in the second month of forecasting (November), where the largest differences were for the first and third months of forecasting (October and December). The ARIMA method gives better results in the longest-term forecasting period (for two months prediction).

**Table 7.** Sawdust and shavings price prediction.

	ARIMA		Winters–Holt
	Actual Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )	Predicted Price (pln/m <sup>3</sup> )
October 2022	550	536.53	472.18
November 2022	550	577.13	498.45
December 2022	450	607.29	545.45

Source: Own elaboration based on obtained data [33–38].

### 3.5. Summary

The actual and predicted prices were compared to identify the errors that resulted from the prediction method used, and their level was determined.

The error comparison for both methods shows the variation in results (Tables 8 and 9). The RMSEs obtained using two methods are very similar, i.e., it can be concluded that the methods provide similar prediction efficiency. The methods used overestimated the forecast values. In the case of pine bark and sawdust and shavings, the forecasted prices were lower than the real prices. The RMSE is based on the exponentiation operation. As a result, it is much more prone to impose larger penalties with larger differences between the predicted values and the actual values. It is also related to the sensitivity of this measure to outliers. On the other hand, the MAE, being the average of the absolute values of the prediction errors, is more intuitive, but also gentler in situations where the difference between the predicted and the actual value is large. It can therefore be concluded that the best model selected using the RMSE value is the model that was able to better predict the values of the set's outliers. On the other hand, looking through the MAE analysis and guided by the average of the absolute error values, the selected model is generally able to correctly predict price values, but it may make larger errors when outliers occur.

**Table 8.** Summary of MAE, MAPE and RMSE for the prediction using ARIMA.

	Paper Chips			Lumber Chips			Pine Bark			Sawdust and Shavings		
	MAE	MAPE [%]	RMSE	MAE	MAPE [%]	RMSE	MAE	MAPE [%]	RMSE	MAE	MAPE [%]	RMSE
October 2022	44.27	11.07	6.65	46.56	11.64	3.41	20	6.67	4.47	13.47	2.45	3.67
November 2022	75.68	18.92	8.70	63.49	15.87	3.98	20	6.67	4.47	27.13	4.93	5.21
December 2022	121.78	32.91	11.04	130.41	37.26	6.10	20	6.67	4.47	157.29	34.95	12.54

**Table 9.** Summary of MAE, MAPE and RMSE for the prediction using WH.

	Paper Chips			Lumber Chips			Pine Bark			Sawdust and Shavings		
	MAE	MAPE [%]	RMSE	MAE	MAPE [%]	RMSE	MAE	MAPE [%]	RMSE	MAE	MAPE [%]	RMSE
October 2022	26.25	6.56	5.12	14.87	3.72	3.86	18.49	6.16	4.30	77.82	14.15	8.82
November 2022	46.87	11.72	6.85	15.97	3.99	4.00	28.55	9.52	5.34	51.55	9.37	7.18
December 2022	93.93	25.39	9.69	104.12	29.75	10.20	42.4	14.13	6.51	95.45	21.21	9.77

The Diebold–Mariano accuracy test for the October–December 2022 period provides results that can be interpreted as the significance of prediction efficiency. In observing the prediction results and the fact that *p*-value is high, it can be concluded that WH does

not have better efficiency than ARIMA (Table 10). This does not necessarily mean that its prediction efficiency is worse.

**Table 10.** Diebold–Mariano test results of the prediction efficiency of ARIMA and WH.

Sorting	p-Value	Program R Confirmation
Paper chips	0.05951	Confirmation
Lumber chips	0.04165	Confirmation
Fine bark	0.8471	Confirmation
Sawdust and shavings	0.3655	Confirmation

#### 4. Discussion

Price fluctuations due to market, natural conditions and organizational conditions [69,70] are one of the main sources of uncertainty in economic planning [40,55]. Hence, the stability and predictability of the market is an incentive for investors with regard to investment decisions for the development of a particular industry. Knowledge of the causes of price fluctuations and trends is the basis for a deep understanding of the system mechanisms and development trends of related research fields [71]. Identification of factors influencing price formation, as well as the ability to implement them in economic planning, becomes an essential condition for the survival of business entities in the current volatile environment. Price prediction is one of the basic instruments for supporting decision-making processes in the economy. Therefore, knowledge of market prices, in this case the price of forest biomass, seems to benefit both suppliers and buyers of wood raw material [72].

Prices of harvested wood by-product assortments are shaped by many market factors. Observed technological changes and regulatory adjustments, as well as increasing optimization of wood utilization, are the main factors influencing fluctuations in the wood products trade [73]. In most cases, the change in prices of wood processing by-products is caused by an increase in demand for both cellulose and biomass energy materials. In the future, the industrial biomass utilization sector may gain importance due to the interest and consumption of renewable biomass sources. Based on studies [74], this is influenced by EU policies [75] regarding the market for firewood and industrial wood (pulp and paper industry). At the same time, for proper economic planning, it is necessary to have knowledge of, among others, changes in the markets. One of the key elements of this process is the prediction of timber prices. The solution to the problems of price changes in the timber market can be the development of monitoring of the timber customer market in the country and in the European and world markets by evaluating the level of trade in by-products of wood processing, reviewing prices at the appropriate frequency and responding to these changes. Price prediction is one of the elements of demand evaluation by timber producers in the near future, and support with modeling can be a valuable economic tool [76]. Taking this into account, it is justifiable to undertake efforts aimed at revealing prediction methods that allow the building of predictions that best match the reality shaped by the above-mentioned variables.

In predictive analyses of price changes, it is necessary to focus on new sectors of timber industry activity (paper production, lumber trade, biomass as a renewable energy source). The timber industry [77] operates based on market factors that shape supply and demand in the primary timber market. Differences in the cyclicity of price changes between different products (woodchips, sawdust and bark) are largely due to product demand [78]. Changes in market preferences determine long-term trends in the industrial products sector. The cyclical nature of pricing patterns for industrial biomass is related to the condition of the European economy responsible for overall fluctuations in timber prices. From 2018 to 2022, there have been dynamic economic changes due to an increase in the supply of roundwood and its products. It is possible to notice fluctuations that revealed large increases in the prices of wood biomass in Poland by as much as PLN 200–350/m<sup>3</sup> in the case of the paper or lumber chip sort in 2018–2022; for the sawdust and shavings sort, it was as high as

PLN 375/m<sup>3</sup> [63,64]. After recent years of stable price increases, significant changes in demand translated into a sharp increase in prices starting in the second quarter of 2022. The situation in the European timber market was also related to the phases of the global economic cycle. The increase in the price of wood by-products in European countries in 2022 was due to the energy crisis. In the first and fourth quarters of 2022, there was an increase in selling prices. The fluctuations in prices coincided with the peak in the Polish timber economy due to rising demand from the construction sector. However, demand for wood processing by-product sorts in Poland was particularly dominated by solid fuel shortages. In this situation, research verifying the feasibility of using various methods to identify future market changes, including price, is particularly important.

The price of bark resulting from its supply (both quantity and assortment structure) depends primarily on the seasonality of demand in the horticultural area and the stable level of supply to customers. Studies have confirmed high price stability for bark supply both in Poland and Europe [79]. According to the research, the price and supply of woodchips and sawdust, as well as wood shavings, is an effect of both market and non-market factors, depending on the products and geographic region [80]. Wood biomass (chips, sawdust, shavings), which is a by-product of industrial processing, shows higher price elasticity than bark [81], suggesting that price changes have less impact on the supply of industrial biomass from sawmill wood processing [82,83]. Analyses carried out using prediction models [46,54,84,85] and, in the case under review, using the ARIMA model, which is popular for forest resource evaluation, and WH [21,55,68,86,87] confirmed the occurrence of projected increases in bark prices at an overall level of 6%. Comparing the deviations for 2018–2022 (projected), while the other woodchip sorts significantly deviated from the acceptable level, exceeding 10%, in the case of sawdust and bark, the increases in deviations of projected prices in 2022 were significant (−35%). The largest increase in prices was found in the case of assortments such as woodchips at the end of the third and the beginning of the sixth quarter in 2022 (Figure 2). The scale of monthly measurements only slightly ensures predictability of revenues, limiting the possibility of making economic decisions during the year. The analysis of information using the autocorrelation of prices of individual wood industry by-products allows us to illustrate the seasonality for the studied assortments. Such a situation can be observed in the case of sawdust sort, which increased its price in the winter months of 2022. This also causes an increase in the price of fuel products for individual customers supplied by suppliers representing the timber industry. At this point, it can be observed that other wood sorts also have a seasonal characteristic.

One of the commonly used methods for change prediction is ARIMA. Diego R. Broz [85] claims that this method usually provides highly satisfactory fits with low data collection costs. On the other hand, this type of model shows poor results in long-term prediction and predicting unusual movements [88]. Taking this into account, it was decided to verify the usefulness of this method for predicting prices for the analyzed wood assortments. Based on this research, it was found that the application of ARIMA for paper and lumber chip prices under market uncertainty showed large deviations of prediction results from actual results. The MAPE for ARIMA was found to be larger than that for WH. The deviations found for ARIMA, on the order of 20% (Tables 7–9), may fluctuate further within the operations of timber companies in 2023 and beyond, which is a result of, among others, rapid changes in energy biomass prices. Rapid declines, often caused by market factors, in such wide ranges can be difficult to identify. In the studied time horizon of 2017–2022, irregular fluctuations in prediction price changes for wood processing by-products were an uncertain part of the analyzed data. The nature of strong market disturbances (including political ones) significantly affected the price of assortments.

This is also the result of changes in the price of wood raw material traded between the Polish and Western European markets on the one hand, and the Baltic and Scandinavian markets on the other [89]. The intensification of the energy crisis in Central Europe has led to an increase in investments using renewable energy sources (RES). Measures to ensure access to thermal energy as well as electricity have shifted price fluctuations (increases) to

sorted groups that can be used to generate thermal energy (forest biomass and wood by-products of mechanical processing), thus relieving the use of fossil fuels. The popularization of low-quality biomass use is fostered by the founding of the New Green Deal [75], which defines the use of woody biomass with a reduction in the harvesting of forest biomass. Changes in the price level of woody biomass play a huge role in planning the cost of its purchase. This is especially important given the situation on the eastern side of Poland. Some of the largest suppliers of wood residues were Eastern European countries, i.e., Ukraine, Russia and Belarus [90]. Reduced resources by the suspension of imports from Eastern countries is one of the reasons for increased prices of wood raw materials intended for biomass purposes.

## 5. Conclusions

Over the studied time horizon, the prices of products under study show a strong upward trend both in terms of direction and broad amplitude of change (Figure 2). Verification of the adopted monthly time series was used to analyze the overall variability of price components depending on the parameter causing the price fluctuation and the time horizon of change.

Both ARIMA and WH showed that the quality of obtained predictions decreased within the period for which the prediction was made. On the basis of research conducted, both methods can be recommended for predicting the future price up to one month in advance. In addition, it was found that the periodic deviation of prediction price levels from the actual ones occurring in the time horizons studied (months, quarters) is unstable.

Seasonal fluctuations in the price of by-products occurring in the annual horizon are related to the seasonality of demand sourcing for energy wood. Seasonality was characterized by assortments such as woodchips and sawdust. For pine bark, strong seasonality in price changes was not found. Price patterns depend on the sorting of wood processing by-products.

Analysis of the overall volatility of timber prices and supply allows for the use of ARIMA and WH in predicting timber prices and planning the amount of timber to be harvested in short time horizons by adjusting the assortment structure of wood processing by-products to changes in market demand. The hypothesis that ARIMA and WH models can be used to forecast biomass market prices was confirmed.

Long-term price changes, on the other hand, require prediction with higher measurement frequency or the use of models such as WH and ARIMA in short-term evaluations. In the long term, increasing demand for timber will result in a gradual increase in prices, which is not consistent with the indications made in the modeled example. Further research requires the introduction of new models to determine the impact of changes on the prediction of prices of wood by-products in both Poland and other European countries.

The conclusion of a comparison between ARIMA and WH is to fit the method to the market conditions of a given sort. In the case of sawdust and wood chips and pine bark, where they are characterized by seasonality, ARIMA is a better fit for the prediction model, while in the case of lumber and paper chips, which are stable in the market, WH is a better prediction model. However, the authors tend to verify ARIMA and WH in a weekly time series. The practical aspect of study results was to determine the usefulness of both models for the correct forecasting of industrial biomass prices depending on the relevant market conditions of the given assortments.

**Author Contributions:** Conceptualization, A.G.; methodology, A.G.; software, A.S.-B.; validation, K.A., Z.S. and M.W.; formal analysis, Z.S.; investigation, A.K.; resources, A.G.; data curation, M.W. and M.S.-G.; writing—original draft preparation, A.G.; writing—review and editing, M.W.; visualization, A.S.-B.; supervision, K.A. and A.K.; project administration, M.W.; funding acquisition, K.A. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** Data is contained within the article.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## References

1. Readiness for the Future of Production Report 2018. Available online: [https://www3.weforum.org/docs/FOP\\_Readiness\\_Report\\_2018.pdf](https://www3.weforum.org/docs/FOP_Readiness_Report_2018.pdf) (accessed on 27 February 2023).
2. Forests and Agriculture. Available online: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/forests-and-agriculture\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/forests-and-agriculture_en) (accessed on 27 February 2023).
3. International Action on Climate Change. Available online: [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/international-action-climate-change_en) (accessed on 16 September 2021).
4. Daian, G.; Ozarska, B. Wood waste management practices and strategies to increase sustainability standards in the Australian wooden furniture manufacturing sector. *J. Clean. Prod.* **2009**, *17*, 1594–1602. [CrossRef]
5. Lieder, M.; Rashid, A. Towards circular economy implementation: A comprehensive review in context of manufacturing industry. *J. Clean. Prod.* **2016**, *115*, 36–51. [CrossRef]
6. Santibanez Gonzalez, E.D.; Koh, L.; Leung, J. Towards a circular economy production system: Trends and challenges for operations management. *Int. J. Prod. Res.* **2019**, *57*, 7209–7218. [CrossRef]
7. Gillabel, J.; Manshoven, S.; Grossi, F.; Fogh Mortensen, L.; Coscieme, L. Eionet Report—ETC/WMGE 2021/2: Business Models in a Circular Economy. Available online: <https://vdocuments.net/business-models-in-a-circular-economy-eionet-portal-2021-2-2-the-potential.html?page=1> (accessed on 16 September 2021).
8. Circular Economy Fact Sheet. Available online: [https://ec.europa.eu/environment/enveco/pdf/FACT\\_SHEET\\_iv\\_Circular\\_Economy.pdf](https://ec.europa.eu/environment/enveco/pdf/FACT_SHEET_iv_Circular_Economy.pdf) (accessed on 25 January 2023).
9. Bell, J.E.; Mollenkopf, D.A.; Stolze, H.J. Natural resource scarcity and the closed-loop supply chain: A resource-advantage view. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag.* **2013**, *43*, 351–379. [CrossRef]
10. Encyklopedia Leśna. Kaskadowe Wykorzystanie Drewna. Available online: [encyklopedialesna.pl](https://encyklopedialesna.pl) (accessed on 16 September 2022).
11. Neykov, N.; Antov, P.; Savov, V. Circular economy opportunities for economic efficiency improvement in wood-based panel industry. In Proceedings of the 11th International Scientific Conference “Business and Management 2020”, Vilnius, Lithuania, 7–8 May 2020. [CrossRef]
12. Maroušek, J.; Trakal, L. Techno-economic analysis reveals the untapped potential of wood biochar. *Chemosphere* **2022**, *291*, 133000. [CrossRef] [PubMed]
13. Anderson, J.O.; Westerlund, L. Improved energy efficiency in sawmill drying system. *Appl. Energy* **2014**, *113*, 891–901. [CrossRef]
14. Durana, P.; Michalkova, L.; Privara, A.; Marousek, J.; Tumpach, M. Does the life cycle affect earnings management and bankruptcy? *Oeconomia Copernic.* **2021**, *12*, 425–461. [CrossRef]
15. Kováčová, M.; Hrošová, L.; Durana, P.; Horak, J. Earnings management model for Visegrad Group as an immanent part of creative accounting. *Oeconomia Copernic.* **2022**, *13*, 1143–1176. [CrossRef]
16. Gajdosikova, D.; Valaskova, K.; Durana, P. Earnings Management and Corporate Performance in the Scope of Firm-Specific Features. *J. Risk Financial Manag.* **2022**, *15*, 426. [CrossRef]
17. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on Waste and Repealing Certain Directives. Dz.U.UE.L.08.312.3. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=HU> (accessed on 10 November 2022).
18. Ustawa z Dnia 14 Grudnia 2012 r. o Odpadach. Dz.U. 2013 Poz. 21. Available online: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU2013000021/T/D20130021L.pdf> (accessed on 10 November 2022).
19. Pn-En 14961-1:2010—Part 1; General Requirements. Available online: <https://standards.itech.ai/catalog/standards/cen/fc112352-281a-4465-9034-be81d919fab6/en-14961-1-2010> (accessed on 10 November 2022).
20. Pn-En 14961-4:2011—Part 4; Wood Chips. Available online: <https://standards.itech.ai/catalog/standards/cen/6181238e-8976-4ef4-9bbe-577082a7e739/en-14961-4-2011> (accessed on 10 November 2022).
21. Wieruszewski, M.; Rogoziński, T. Dust Creation in Milling the Self-Locking Longitudinal Joints in Pine Wood. *Intercathedra* **2013**, *29*, 80–84. Available online: <http://www1.up.poznan.pl/intercathedra/files/Intercathedra%202013%20No%2029-4.pdf> (accessed on 10 November 2022).
22. Walkiewicz, J.; Kawalerczyk, J.; Mirski, R.; Dziurka, D.; Wieruszewski, M. The Application of Various Bark Species as a Fillers for UF Resin in Plywood Manufacturing. *Materials* **2022**, *15*, 7201. [CrossRef] [PubMed]
23. 2030 Climate & Energy Framework. Available online: [https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework\\_pl](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_pl) (accessed on 10 November 2022).
24. Górna, A.; Wieruszewski, M.; Szabelska-Beresevicz, A.; Stanula, Z.; Adamowicz, K. Biomass Price Prediction Based on the Example of Poland. *Forests* **2022**, *13*, 2179. [CrossRef]
25. Kożuch, A.; Cywicka, D.; Adamowicz, K. A Comparison of Artificial Neural Network and Time Series Models for Timber Price Prediction. *Forests* **2023**, *14*, 177. [CrossRef]
26. Raha, D.; Mahanta, P.; Clarke, M.L. The implementation of decentralised biogas plants in Assam, NE India: The impact and effectiveness of the National Biogas and Manure Management Programme. *Energy Policy* **2014**, *68*, 80–91. [CrossRef]
27. Röder, M.; Thornley, P. Waste wood as bioenergy feedstock. Climate change impacts and related emission uncertainties from waste wood based energy systems in the UK. *Waste Manag.* **2018**, *74*, 241–252. [CrossRef]

28. Maroušek, J. Use of continuous pressure shockwaves apparatus in rapeseed oil processing. *Clean Techn. Env. Policy* **2013**, *15*, 721–725. [CrossRef]
29. Mydlarz, K.; Wieruszewski, M. Economic, Technological as Well as Environmental and Social Aspects of Local Use of Wood By-Products Generated in Sawmills for Energy Purposes. *Energies* **2022**, *15*, 1337. [CrossRef]
30. Statistical Yearbook of Forestry. 2015. Available online: <https://stat.gov.pl/en/topics/agriculture-forestry/forestry/> (accessed on 10 November 2022).
31. Statistical Yearbook of Forestry. 2016. Available online: <https://stat.gov.pl/en/topics/agriculture-forestry/forestry/forestry-2016,1,7.html> (accessed on 10 November 2022).
32. Statistical Yearbook of Forestry. 2017. Available online: <https://stat.gov.pl/en/topics/agriculture-forestry/forestry/forestry-2017,1,8.html> (accessed on 10 November 2022).
33. Statistical Yearbook of Forestry. 2018. Available online: [https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/1/1/statistical\\_yearbook\\_of\\_forestry\\_2018.pdf](https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/1/1/statistical_yearbook_of_forestry_2018.pdf) (accessed on 10 November 2022).
34. Statistical Yearbook of Forestry. 2019. Available online: [https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/2/1/statistical\\_yearbook\\_of\\_forestry\\_2019.pdf](https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/2/1/statistical_yearbook_of_forestry_2019.pdf) (accessed on 10 November 2022).
35. Statistical Yearbook of Forestry. 2020. Available online: [https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/3/1/statistical\\_yearbook\\_of\\_forestry\\_2020.pdf](https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/3/1/statistical_yearbook_of_forestry_2020.pdf) (accessed on 10 November 2022).
36. Statistical Yearbook of Forestry. 2021. Available online: [https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/4/1/statistical\\_yearbook\\_of\\_forestry\\_2021.pdf](https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/4/1/statistical_yearbook_of_forestry_2021.pdf) (accessed on 10 November 2022).
37. Statistical Yearbook of Forestry. 2022. Available online: [https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/5/1/statistical\\_yearbook\\_of\\_forestry\\_2022.pdf](https://stat.gov.pl/files/gfx/portalinformacyjny/en/defaultaktualnosci/3328/12/5/1/statistical_yearbook_of_forestry_2022.pdf) (accessed on 10 November 2022).
38. Wieruszewski, M.; Trociński, A.; Kawalerczyk, J. The effect of raw material selection on material efficiency indicators in large-sized roundwood processing. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar.* **2020**, *19*, 105–112.
39. Leskinen, P.; Kangas, J. Modelling Future Timber Price Development by Using Expert Judgments and Time Series Analysis. *Silva Fenn.* **2001**, *35*, 93–102. [CrossRef]
40. Szramka, H.; Bieniaszewski, T.; Auguscik, Ł.; Bobek, J.; Adamowicz, K. Wpływ wad drewna wielkowymiarowego na przychody z jego sprzedaży. *Sylvan* **2017**, *161*, 238–246. [CrossRef]
41. Borzykowski, N. A supply-demand modeling of the Swiss roundwood market: Actors responsiveness and CO<sub>2</sub> implications. *For. Policy Econ.* **2019**, *102*, 100–113. [CrossRef]
42. Holm, S.; Hilty, L.M.; Lemm, R.; Thees, O. Empirical validation of an agent-based model of wood markets in Switzerland. *PLoS ONE* **2018**, *13*, e0190605. [CrossRef]
43. Knauf, M. An Analysis of Wood Market Balance Modeling in Germany. *For. Policy Con.* **2015**, *50*, 319–326. [CrossRef]
44. Olsson, O.; Hillring, B. Price relationships and market integration in the Swedish wood fuel market. *Biomass Bioenergy* **2013**, *57*, 78–85. [CrossRef]
45. Prestemon, J.P.; Holmes, T.P. Timber price dynamics following a natural catastrophe. *Am. J. Agric. Econ.* **2000**, *82*, 145–160. [CrossRef]
46. Penttinen, M.J. Impact of stochastic price and growth processes on optimal rotation age. *Eur. J. Forest Res.* **2006**, *125*, 335–343. [CrossRef]
47. Kolo, H.; Tzanova, P. Predictioning the German forest products trade: A vector error correction model. *J. For. Econ.* **2017**, *26*, 30–45. [CrossRef]
48. Buongiorno, J. Global modelling to predict timber production and prices: The GPPM approach. *Forestry* **2015**, *88*, 291–303. [CrossRef]
49. Gejdoš, M.; Lieskovský, M.; Giertliová, B.; Němec, M.; Danihelová, Z. Prices of Raw-Wood Assortments in Selected Markets of Central Europe and their Development in the Future. *Bioresources* **2019**, *14*, 2995–3011. [CrossRef]
50. Toppinen, A.; Kuuluvainen, J. Forest sector modelling in Europe—The state of the art and future research directions. *For. Policy Econ.* **2010**, *12*, 2–8. [CrossRef]
51. National Bank of Poland. Exchange Rate of the Polish National Bank. Available online: <https://www.nbp.pl/home.aspx?f=/statystyka/kursy.html> (accessed on 4 August 2022).
52. Shiskin, J.; Young, A.H.; Musgrave, J.C. *The X-11 Variant of the Census Method II Seasonal Adjustment Program, Technical Paper 15*; US Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1967.
53. Hodrick, R.; Prescott, E.C.; Postwar, U.S. Business Cycles: An Empirical Investigation. *J. Money Credit Bank.* **1997**, *29*, 1–16. Available online: <http://www.jstor.org/stable/2953682?origin=JSTOR-pdf> (accessed on 10 November 2022). [CrossRef]
54. Leskinen, P.; Kangas, J. Modelling and simulation of timber prices for forest planning calculations. *Scand. J. For. Res.* **1998**, *13*, 469–476. [CrossRef]
55. Michinaka, T.; Kuboyama, H.; Tamura, K.; Oka, H.; Yamamoto, N. Predictioning Monthly Prices of Japanese Logs. *Forests* **2016**, *7*, 94. [CrossRef]
56. Prestemon, J.P. Evaluation of U.S. southern pine stumpage market informational efficiency. *Can. J. For. Res.* **2003**, *33*, 561–572. [CrossRef]
57. Zhou, M.; Buongiorno, J. Space-Time Modeling of Timber Prices. *J. Agric. Resour. Econ.* **2006**, *31*, 40–56. Available online: <https://www.jstor.org/stable/40987305> (accessed on 20 December 2022).

58. Malaty, R.; Toppinen, A.; Viitanen, J. Modelling and prediction of Finnish pine sawlog stumpage prices using alternative time-series methods. *Can. J. For. Res.* **2006**, *37*, 178–187. [CrossRef]
59. Bolkesjo, T.F. Projecting pulpwood prices under different assumptions on future capacities in the pulp and paper industry. *Silva Fenn.* **2005**, *39*, 103–116. [CrossRef]
60. Dahal, P.; Mehmood, S. Determinants of timber bid prices in Arkansas. *For. Prod. J.* **2005**, *55*, 89–94.
61. Kallio, A. Analysing the Finnish pulpwood market under alternative hypotheses of competition. *Can. J. For. Res.* **2011**, *31*, 236–245. [CrossRef]
62. Sun, C.; Zhang, D. Assessing the financial performance of forestry related investment vehicles: Capital asset pricing model vs. arbitrage pricing theory. *Am. J. Agric. Econ.* **2001**, *83*, 617–628. Available online: <https://www.jstor.org/stable/1245091> (accessed on 12 December 2022). [CrossRef]
63. Bebkiewicz, K.; Boryń, E.; Chłopek, Z.; Kargulewicz, A.D.I.; Olecka, A.; Rutkowski, J.; Cieśliński, R. Zeroemisyjność bez stopni zasilania, czyli rola stabilnej generacji energii w dekarbonizacji Polski. *Life* **2020**, *1329*, 1356. Available online: [https://www.researchgate.net/profile/Maciej-Lipka/publication/367655719\\_Zeroemisyjnosc\\_bez\\_stopni\\_zasilania\\_czyli\\_rola\\_stabilnej\\_generacji\\_energii\\_w\\_dekarbonizacji\\_Polski/links/63da322762d2a24f92e55bd4/Zeroemisyjnosc-bez-stopni-zasilania-czyli-rola-stabilnej-generacji-energii-w-dekarbonizacji-Polski.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Maciej-Lipka/publication/367655719_Zeroemisyjnosc_bez_stopni_zasilania_czyli_rola_stabilnej_generacji_energii_w_dekarbonizacji_Polski/links/63da322762d2a24f92e55bd4/Zeroemisyjnosc-bez-stopni-zasilania-czyli-rola-stabilnej-generacji-energii-w-dekarbonizacji-Polski.pdf) (accessed on 7 March 2023).
64. Litwinowicz-Krakus, J.; Regulski, B. Międzynarodowy Aspekt Rynku Biomasy. Available online: <https://magazybiomasa.pl/rynek-biomasy-i-wszystkie-jego-miedzynarodowe-aspekty/> (accessed on 7 March 2023).
65. Diebold, F.X.; Mariano, R.S. Comparing predictive accuracy. *J. Bus. Econ. Stat.* **1995**, *13*, 253–263. Available online: <https://www.sas.upenn.edu/fdiebold/papers/paper68/pa.dm.pdf> (accessed on 10 November 2022).
66. Harvey, D.; Leybourne, S.; Newbold, P. Testing the equality of prediction mean squared errors. *Int. J. Predict.* **1997**, *13*, 281–291. [CrossRef]
67. Kagalwala, A. kpsstest: A command that implements the Kwiatkowski, Phillips, Schmidt, and Shin test with sample-specific critical values and reports p-values. *Stata J.* **2022**, *22*, 269–292. [CrossRef]
68. Yasar, H.; Kilimci, Z.H. US Dollar/Turkish Lira Exchange Rate Prediction Model Based on Deep Learning Methodologies and Time Series Analysis. *Symmetry* **2020**, *12*, 1553. [CrossRef]
69. Zwirgmaier, K. *Seasonality of Prices—The Example of German Timber Prices*; Technische Universität München: Munich, Germany, 2010. Available online: [http://www.gipecofor.org/doc/drupal/liens\\_article/evenements/2010/ZWIRGLMAIER\\_IUFRO\\_Paris\\_Mai2010.pdf](http://www.gipecofor.org/doc/drupal/liens_article/evenements/2010/ZWIRGLMAIER_IUFRO_Paris_Mai2010.pdf) (accessed on 10 November 2022).
70. Adedoyin, F.F.; Afolabi, J.O.; Yalciner, K.; Bekun, F.V. The export-led growth in Malaysia: Does economic policy uncertainty and geopolitical risks matter? *J. Public Aff.* **2022**, *22*, e2361. [CrossRef]
71. Chai, J.; Wang, Y.; Wang, S.; Wang, Y. A decomposition–integration model with dynamic fuzzy reconstruction for crude oil price prediction and the implications for sustainable development. *J. Clean. Prod.* **2019**, *229*, 775–786. Available online: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201900362165> (accessed on 10 November 2022). [CrossRef]
72. Kozuch, A.; Ankudo–Jankowska, A. Analiza cen drewna brzoźowego w Polsce oraz wybranych krajach Europy. *Sylvan* **2021**, *165*, 489–500. [CrossRef]
73. Sikkema, R.; Steiner, M.; Junginger, M.; Hiegl, W.; Hansen, M.T.; Faaij, A. The European wood pellet markets: Current status and prospects for 2020. *Biofuels Bioprod. Biorefining* **2011**, *5*, 250–278. [CrossRef]
74. Simanov, V. Fuel, or Assortment for Energy Use? 2009. Available online: [Biom.cz](http://biom.cz) (accessed on 27 July 2022).
75. *European Green Deal: Commission Proposes Transformation of EU Economy and Society to Meet Climate Ambitions*; European Commission: Brussels, Belgium, 2021.
76. Alakangas, E.; Hillring, B.; Nikolaisen, L.S. *Trade of solid biofuels, and fuel prices in Europe*; (No. NEI-SE-376); Swedish University of Agricultural Sciences: Uppsala, Sweden, 2002. Available online: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/048/33048183.pdf?r=1](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/048/33048183.pdf?r=1) (accessed on 10 November 2022).
77. Mehrotra, S.N.; Kant, S.; Majumdar, I. Industry Cycles in the US Softwood Lumber Industry: 1985 through 2010. *For. Prod. J.* **2014**, *64*, 116–125. [CrossRef]
78. Petersen, B.; Strongin, S. Why are some industries more cyclical than others? *J. Bus. Econ. Stat.* **1996**, *14*, 189–198.
79. Solberg, B. *An Econometric Analysis of Timber Supply in Eight Northwestern European Countries*; EFI Technical Report No. 44; European Forest Institute: Joensuu, Finland, 2011. Available online: <https://efi.int/publicationsbank/econometric-analysis-timber-supply-eight-northwestern-european-countries> (accessed on 4 November 2022).
80. Tian, N.; Poudyal, N.C.; Augé, R.M.; Hodges, D.G.; Young, T.M. Meta-Analysis of Price Responsiveness of Timber Supply. *For. Products J.* **2017**, *67*, 152–163. [CrossRef]
81. Kozuch, A.; Banaś, J. The Dynamics of Beech Roundwood Prices in Selected Central European Markets. *Forests* **2020**, *11*, 902. [CrossRef]
82. Polyakov, M.; Wear, D.N.; Huggett, R.N. Harvest Choice and Timber Supply Models for Forest Prediction. *For. Sci.* **2010**, *56*, 344–355.
83. Cökhan, Ş.E.N.; Güngör, E. Determination of the seasonal effect on the auction prices of timbers and prediction of future prices. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi* **2018**, *20*, 266–277. Available online: <https://dergipark.org.tr/en/pub/barofd/issue/36468/418009> (accessed on 29 December 2022).
84. Tzanova, P. Time series analysis for short-term forest sector market prediction. *Austrian J. For. Sci.* **2017**, *134*, 205–229.

85. Broz, D.R.; Viego, V.N. Predictioning prices of manufactured *Pinus spp.* using ARIMA models. *Madera y Bosques* **2014**, *20*, 37–46. Available online: <https://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v20n1/v20n1a4.pdf> (accessed on 4 November 2022). [[CrossRef](#)]
86. Li, S.; Yang, X.; Li, R. Predictioning China's coal power installed capacity: A comparison of MGM, ARIMA, GM-ARIMA, and NMGM models. *Sustainability* **2018**, *10*, 506. [[CrossRef](#)]
87. Yin, R. Predictioning short-term timber prices with univariate ARIMA models. *South. J. Appl. For.* **1999**, *23*, 53–58. [[CrossRef](#)]
88. Chu, K.Y. Short-run predictioning of commodity prices: An application of autoregressive moving average models. *IMF Staff. Pap.* **1978**, *25*, 90–111. Available online: [https://econpapers.repec.org/article/palimfstp/v\\_3a25\\_3ay\\_3a1978\\_3ai\\_3a1\\_3ap\\_3a90-111.htm](https://econpapers.repec.org/article/palimfstp/v_3a25_3ay_3a1978_3ai_3a1_3ap_3a90-111.htm) (accessed on 25 January 2023). [[CrossRef](#)]
89. Adamowicz, K. Ocena wpływu zmian gospodarczych na ilościowe zmiany podaży surowca drzewnego. *Zarządzanie Ochr. Przyr. Lasach* **2011**, *5*, 189–200.
90. Vlad, I.M.; Toma, E. The Assessment of the Bioeconomy and Biomass Sectors in Central and Eastern European Countries. *Agronomy* **2022**, *12*, 880. [[CrossRef](#)]

**Disclaimer/Publisher's Note:** The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

6. Stanula Z., Wieruszewski M., Dynowska J., Adamowicz K. Comparative efficiency of roundwood processing into pallet lumber. *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*, 2024, Vol. 66 (4), 310–316, w publikacji. DOI: 10.2478/ffp-2024-0023 (#6)



FOLIA FORESTALIA POLONICA  
SERIES A – FORESTRY



JOURNAL OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES AND FOREST RESEARCH INSTITUTE  
established in 1957

Sękocin Stary, 20.11.2024 r.

Szanowny Pan  
Krzysztof Adamowicz  
Poznań University of Life Sciences  
Faculty of Forestry and Wood Technology  
Wojska Polskiego 28  
60-637 Poznań

Redakcja *Folia Forestalia Polonica, Ser. A - Forestry* potwierdza przyjęcie do druku artykułu:

**Comparative efficiency of roundwood processing into pallet lumber**

Zygmunt Stanula<sup>1</sup>, Marek Wieruszewski<sup>2</sup>, Joanna Dynowska<sup>3</sup>, Krzysztof Adamowicz<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> Poznań University of Life Sciences, Faculty of Forestry and Wood Technology, Department of Forestry Economics and Technology, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, Poland, e-mail: krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl

<sup>2</sup> Poznań University of Life Sciences, Faculty of Forestry and Wood Technology, Department of Mechanical Wood Technology, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań, Poland

<sup>3</sup> University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Michała Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn, Poland

Potwierdzamy wysoką wartość naukową artykułu oraz podejmujemy zobowiązanie wydrukowania pracy w czasopiśmie *Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*. Praca uzyskała pozytywne recenzje i obecnie znajduje się w toku redakcyjnego procesu wydawniczego. Publikacja wydrukowana zostanie w czwartym zeszycie Czasopisma w 2024 r. *Folia Forestalia Polonica, Series A - Forestry* nr 66 (4), nr DOI 10.2478/ffp-2024-0023

Z wyrazami szacunku,

BIURO REDAKCYJNE  
FOLIA FORESTALIA POLONICA  
INSTYTUT BADAWCZY LESNICTWA  
Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3,  
05-090 Raszyn  
http://ffp.ibles.pl

dr hab. Małgorzata Sułkowska, prof. IBL

REDAKTOR NACZELNY

*Folia Forestalia Polonica*

Redaktor Naczelny

*Folia Forestalia Polonica, Series A – Forestry*

Editorial Office: Forest Research Institute, Sękocin Stary, Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn, Poland  
ffp@ibles.waw.pl http://ffp.ibles.pl/ www.ibles.pl

## COMPARATIVE EFFICIENCY OF ROUNDWOOD PROCESSING INTO PALLET LUMBER

Zygmunt Stanula<sup>1</sup>, Marek Wieruszewski<sup>2</sup>, Joanna Dynowska<sup>3</sup> and Krzysztof Adamowicz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Forestry Economics and Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland; [zygmunt.stanula@up.poznan.pl](mailto:zygmunt.stanula@up.poznan.pl); [krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl](mailto:krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl)

<sup>2</sup> Department Mechanical Wood Technology, Faculty of Forestry and Wood Technology, Poznan University of Life Sciences, Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznan, Poland; [marek.wieruszewski@up.poznan.pl](mailto:marek.wieruszewski@up.poznan.pl)

<sup>3</sup> Joanna Dynowska University of Warmia and Mazury in Olsztyn, ul. Michała Oczapowskiego 2, 10-719 Olsztyn, Poland; [joanna.dynowska@uwm.edu.pl](mailto:joanna.dynowska@uwm.edu.pl)

• Correspondence: [krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl](mailto:krzysztof.adamowicz@up.poznan.pl) [marek.wieruszewski@up.poznan.pl](mailto:marek.wieruszewski@up.poznan.pl)

### ABSTRACT

The article is an attempt to determine the impact of market changes and sawnwood production on the utilisation of a limited supply of wood raw material, taking into account coniferous species and selected grades found on the market for the production of pallet lumber. The proposal to include the raw material value factor in the econometric model provides a measurable benchmark. Closed efficiency through the criterion of maximising the added value of wood in industrial processing takes into account the parameters that shape the impact of the value of the product and wood raw material. This criterion is derived from the supply of roundwood and customer demand for particular species and grades. The efficiency index is a reference to the price factors of market change over a variable period of time with the ability to forecast the direction of change.

**KEY WORDS:** lumber, technology, efficiency, added value.

### INTRODUCTION

The efficiency of rational processing of wood into materials and products depends on complex production, technological and market factors. In the market conditions of European Union countries, there are for lumber products in, significant differences in terms of resulting from the volume of wood processing for wood plants, as well as production methods resulting from the efficiency of technological equipment. The situation of the sawmill industry in Poland is associated with the emergence of many new variables for lumber producers and operators with very different technical and technological levels. The dynamic development of sawmills is the result of the favourable market situation in 2019–2022 and the policy of timber sales by the State Forests. Changes in market policy have led to a significant shift in the cost intensity of production. As

---

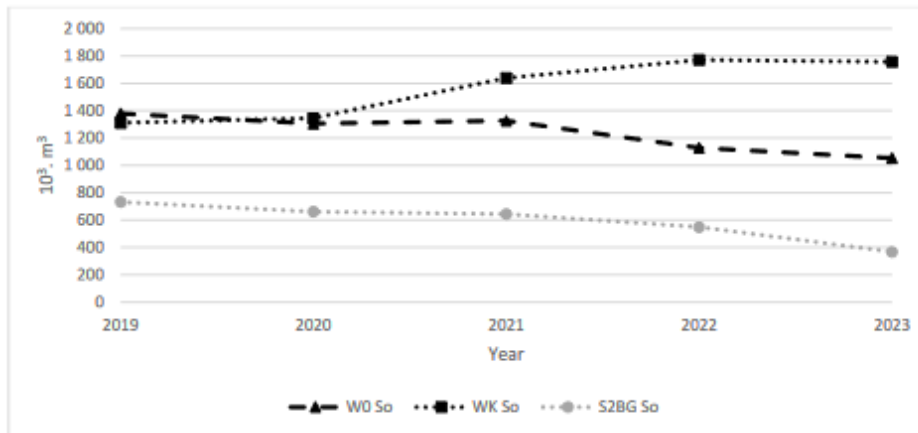
indicated by data from the Central Statistical Office (GUS 2023) according to the Polish Classification of Activities (PKD), the production of wood and wood products, including sawmill products, boards, plywood, veneers, carpentry, furniture, cork and wicker products (excluding furniture), stabilised at 37–42 million m<sup>3</sup> of roundwood. According to an ongoing analysis (Jablonski 2000), and taking into account the amount of raw materials purchased from the State Forests, plants with a capacity of 50,000–400,000 m<sup>3</sup>/year play a dominant role in the Polish lumber industry. The group of small- (up to 5000 cubic meters/year) and medium-sized (from 5000 to 50,000 cubic metres/year) enterprises accounts for the dominant share of the number of Polish wood product-manufacturing plants, employing and presenting the highest growth dynamics (Mydlarz and Wieruszewski 2022).

The concentration of labour potential and its specialisation is due to the reduction in cost-intensive production processes. Examples include German, Austrian and Swedish sawmills that are oriented to the production of large-sized lumber mainly for construction (Krzosek 2003, Lis et al. 2000).

## **MATERIALS AND METHOD**

### *Woodworking technologies*

Technological factors, especially the productivity of raw materials obtained in medium-sized plants in Poland, particularly affect the efficiency of this production. The processes of roundwood processing for the production of lumber and sawmill products are related, on the one hand, to the diverse quality of the roundwood raw material and, on the other hand, depend on the range of products obtained (Kupčák 2015). Traditional processing processes are dominated by various products, enabling the realisation of the requirements of local markets. Examples of harvesting levels and management directions for large-sized round pine timber with a thickness at the thinner end of more than 14 cm (W0 So), large-sized logs up to 6 m (WK So) and medium-sized logs with a thickness at the thinner end without bark up to 5 cm (S2B So) processed at sawmills are shown in Figure 1.

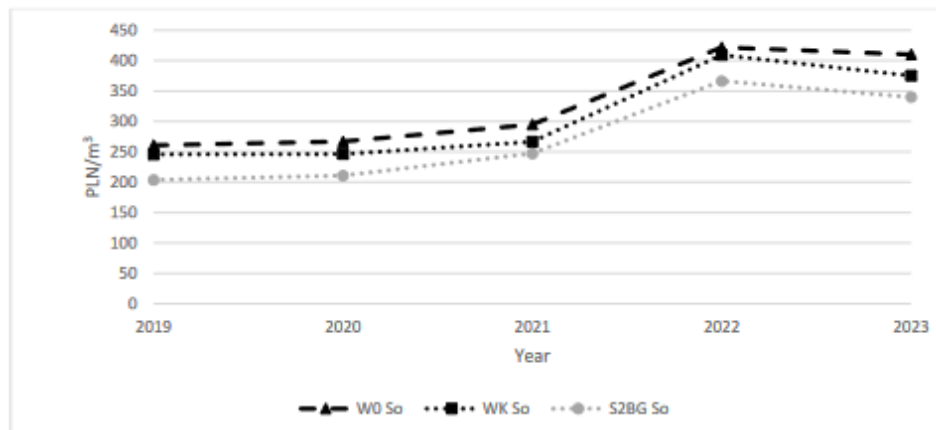


**Figure 1.** Level of use of softwood processed into lumber (www.e-drewno.pl, GUS 2023)

The technologies and equipment used are closely related to the product mix. It is possible to separate the following groups: small plants (employment up to 50 people – income up to €7 million), producing commodity lumber for various purposes; groups of small- and medium-sized sawmills (income up to €40 million – employment up to 250 people) specialising in the production of lumber and general-purpose products for the construction industry (including factories producing roof trusses) using frame, circular and band saws, and performing pre-fabrication operations; groups of small- and medium-sized plants dominated by the production of products and elements of the so-called ‘garden and pallet programme’, which has developed in Poland in recent years and has great dynamism. It should be added that traditional sawing machines and tools, frame saws, and a set of multi-saw equipment are used. These factories use large-scale automation of the process and deep processing of components into final products.

Crisis processes in Europe have resulted in a variable dynamisation of production concentration processes in large wood processing plants (Bidzińska and Ratajczak 2003, Krzosek 2003). The specialisation of production is inextricably linked to the introduction of systemic principles of production quality assurance. This is served by standards that optimise technological processes, which, unlike subject and production standards, are organisational standards and principles of systemic assurance of high, site-independent quality (Cholewa 2000, Jablonski 2000). Systemic assurance of product quality and guarantee of repeatability of products from certified raw

material are implemented by many factories in Poland that use standards: ISO 9001 and PEFC (Programme for Endorsement of Forest Certification) and FSC (Forest Stewardship Council®) certificates. This standardisation of products and production allows for the standardisation of product quality and the effective competition of wood products not only in the domestic market but also in European markets (<https://www.drewno.pl/>, <https://www.e-drewno.pl/stock/>). The main products of roundwood processing with variable price ranges (Fig. 2) are sawn materials with varying market values (Table 1). By-products such as wood chips or sawdust and bark are also obtained as a result of sawmilling (Table 2). The share of these products is closely dependent on the processing technology used and the form of the main products (lumber). Both main products and by-products influence the efficiency index of the production process. Previous studies have confirmed a definite increase in the share of the production of chunk by-products (wood chips – up to 20–30%) with a significant share of sawdust, as a result of sawing (sawdust – 10–15%). In the overall structure, it is acceptable to take the economic effect obtained from the bark (up to 8%) as an additional group of by-products, called ‘waste’ of the process of preparation for sawing (Mydlarz and Wieruszewski 2022). Significant variability in the value of the product is due to local and global market changes. However, the main product, i.e. lumber and its semi-finished products, is the main indicator of the impact on the legitimacy of roundwood processing.



**Figure 2.** Price level of softwood processed into lumber ([www.e-drewno.pl](http://www.e-drewno.pl), GUS 2023)

**Table 1.** Summary of averaged prices for pine pallet lumber (<https://www.drewno.pl/>, <https://www.e-drewno.pl/stock/>, Górna et al. 2023)

Period	Price of pine lumber				
	2019	2020	2021	2022	2023
	PLN/m <sup>3</sup>				
I quarter	440	450	480	1100	1000
II quarter	440	450	600	1300	800
III quarter	440	450	850	1400	700
IV quarter	450	460	1100	1100	600
Mean	442.5	452.5	757.5	1225.0	775.0

**Table 2.** Summary of averaged prices of pine by-products in 2019–2023 (<https://www.drewno.pl/>, <https://www.e-drewno.pl/stock/>, Górna et al. 2023)

Name	The by-product ‘falls off’			
	Paper chips	Lumber chips	Pine Bark	Sawdust
Year	PLN/m <sup>3</sup>			
2019	218	163	116	149
2020	192	140	117	135
2021	187	146	121	155
2022	330	329	238	370
2023	288	288	307	318
Participation in the process [%]	20–30		8	10–15

*Influence of technological processes on the efficiency of woodworking*

The technological processes of processing wood into lumber and sawmill products depend, in particular, on the conditions for the purchase of raw materials by various business entities. The analysis of the problem of cost and quality of wood raw material procurement in relation to the industry (Bidzińska and Ratajczak 2003, Jablonski 2000, Krzosek 2003, Lis et al. 2000) cannot abstract from the current structure and size of sawmills in Poland.

Using the universal macro-indicator of technological efficiency of the processing of round raw material into lumber and sawmill products (Ep) formulated in natural units or as a percentage

defined as the sum of the conformity of the value of the lumber raw material (main, accompanying or sawmill products) obtained from the lumber raw material, taking into account the cost of purchasing the raw material, which is necessary for its production, we describe formulas 1 and 2 (Hruzik et al. 2000):

$$Ep = \frac{\sum V_w^q \cdot C_w^q}{\sum V_s^q \cdot (T_r + C_s^q)} * 100 \text{ [%]} \quad [1]$$

Where:

Ep – technological efficiency of raw material processing,

$V_w^q$  – volume ‘q’ class sawnwood,

$V_s^q$  – volume ‘q’ class raw materials,

$C_w^q$  – prices of sawnwood,

$C_s^q$  – prices of raw materials,

$T_r$  – prices of transport.

$$Epc = \frac{\sum V_w^q \cdot C_w^q + V_{pt} \cdot C_{pt} + V_k \cdot C_k}{\sum V_s^q \cdot (T_r + C_s^q)} * 100 \text{ [%]} \quad [2]$$

Epc – full technological efficiency of raw material processing.

$V_{pt}$  – volume ‘q’ class sawnwood,

$V_k$  – volume ‘q’ class raw materials,

$V_w^q$  – volume ‘q’ class sawnwood,

$V_s^q$  – volume ‘q’ class raw materials,

$C_w^q$  – prices of sawnwood,

$C_s^q$  – prices of raw materials,

$C_{pt}$  – prices of wood waste and sawdust,

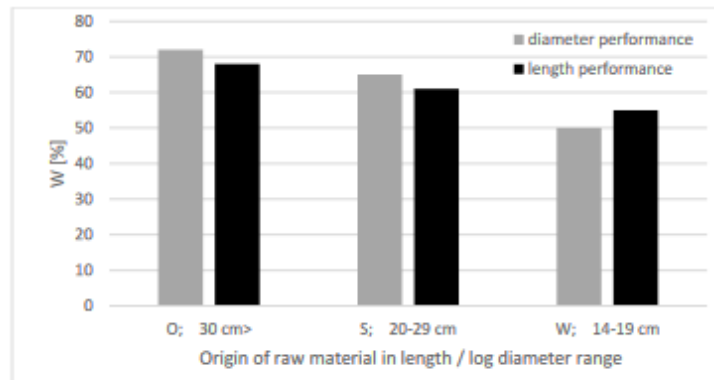
$C_k$  – prices of bark,

$T_r$  – prices of transport.

## RESULTS AND DISCUSSION

Taking into account technological conditions and canons of work, as well as the fact of dimensional and quality variation of roundwood and current price reports (<https://www.drewno.pl/>,

<https://www.e-drewno.pl/stock/>), the average productivity ( $W$ ) of processing pine wood (Figure 3) into pallet lumber in small- and medium-sized general-purpose lumber plants was determined, and production efficiency was analysed based on the formulas presented (Figure 4). The average volume of efficiency adopted for further analysis is 60% where the changes in the price of wood transportation determined, in 2019–2023 oscillated on average at 28, 30, 33, 38 and 35 PLN/m<sup>3</sup> (own market research).



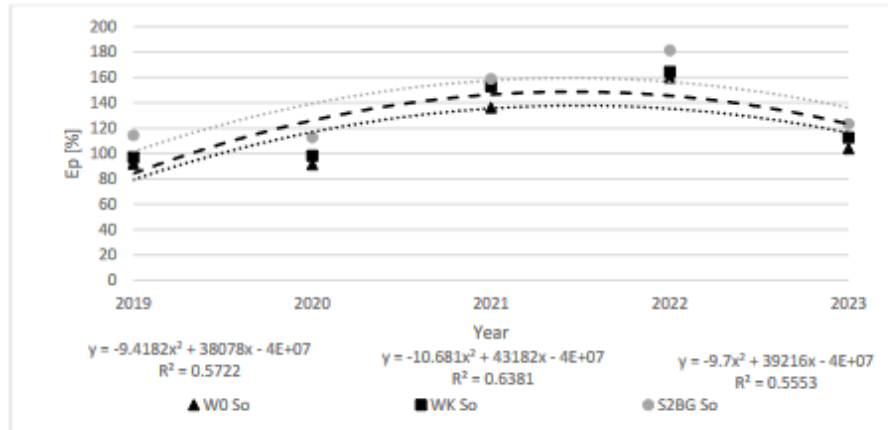
**Figure 3.** Technological efficiency of processing coniferous wood into semi-finished lumber in sawmills (own elaboration, Hruzik et al. 2000, 2005, Mydlarz and Wieruszewski 2022, Wieruszewski et al. 2020, 2023)

It can be concluded that comparing the processing of timber in sawmills in plants that used log quality sorting (O – lower, S – medium and W – upper) with that in plants that used only log diameter category, regardless of the type of plant, the best productivity can be obtained processing lower logs with larger diameters (68–72%), but the lowest productivity was confirmed when processing upper logs with small diameters (50–55%). In general, this regularity shaped the price relations for raw material and lumber in the domestic market, but this is mainly what the source material (EN 1611-1:1999/A1:2002) is limited to.

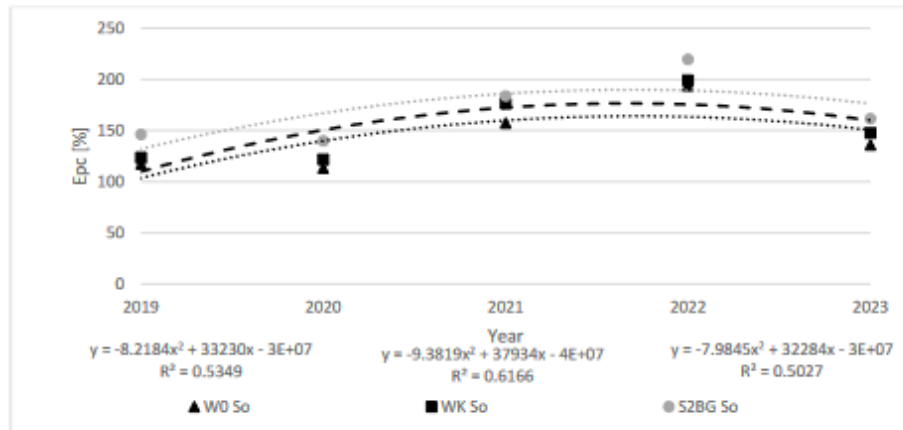
The efficiency of wood processing (Fig. 4) can also be considered in the example of specific grades (elements) of finished pallet products. Examples of the production efficiency of selected pine elements for pallet products made in 2022 (Fig. 3) indicate that these assortments allow for

achieving an average efficiency of  $E_p=101\text{--}168\%$  with similar material and sawing efficiency in the range of  $W=50\text{--}72\%$  (assumed average 60%) (Hruzik et al. 2000, 2005).

The  $E_p$  variability curves show a good fit with the coefficient of determination  $R^2>0.5$ . At the same time, there are no significant differences in the effect of the type of pine raw material on the change in  $E_p$  ( $p=0.5$ ).



**Figure 4.**  $E_p$  processing efficiency of selected grades for pallet lumber production (own elaboration)



**Figure 5.** Total  $E_{pc}$  efficiency including by-products in pallet lumber production (own elaboration)

---

It is worth noting the impact of market prices associated with by-products. They have recently gained in value due to the possibility of obtaining energy biomass from them. This is particularly true for chunk products (wood chips) and sawdust. This translates into an additional component of the economic impact indicator, as presented in Figure 5 in the form of the Epc total efficiency indicator. The ANOVA statistical test showed no significant statistical difference in the effect of the tested by-product forms on Epc ( $p=0.7$ ). At the same time, the functions describing the variability of Epc have a good coefficient of determination  $R^2>0.5$  of matching results.

Plants producing components and pallet products are companies associated in a sphere dominated by production for the European market. Comparative spheres of sawmill production efficiency are supplemented by a potential indicator for large factories (using mainly compact technologies), but products and lumber are currently received by different technologies in sawmills. The potential range of average material efficiency in sawmilling, aligned with the economic indicator formed by the price relationship of raw materials and products, will not be different from the level of efficiency obtained in factories using traditional technologies because the relationship is not shaped by the local market but by the global market. The values of Ep production efficiency of selected pallet assortments in recent years gradually increased from a level of about 91% to 180% in 2022 to begin a sharp decline with the downturn in 2023. The added value of the process is the Epc efficiency effect of the use of by-products. As for lumber, it depends on market price fluctuations. In the structure of reference to the price of raw material, the highest increases in the indicator are obtained by S2BG wood processing where it fell from 31% to 25% in 2019–2021. An additional increase in the by-product efficiency ratio increased significantly in 2022 to a level of 33–38% to remain at a similar level in 2023. In sum, this allowed the efficiency of total Epc processing of pine raw material into pallet lumber to reach 194–220% in 2022 with a decrease in 2023 to 135–161%. This indicates how significant the rational management of by-products in the sawmilling process is.

The wood raw material offered by forest farms can be used in industrial processing for various wood materials and semi-finished products, leading to the manufacture of finished products. This depends mainly on the dimensional and quality structure of the roundwood of a given species. Different will be the shares of the various destiny grades of raw material from the division of arrows of higher classes of thickness and quality, while others from thinner arrows

---

harvested during silvicultural operations in the forest. However, from a given arrow in a certain size group and height of trees, it is possible to manipulate different sorts according to demand, which is currently a topic of discussion among specialists. The direction of wood utilisation depends on a number of more or less important factors. The decisive one is the profitability of wood processing that can be quantified and analysed. It can be expected that, over time, the wood market will move towards the most efficient structure of its utilisation through the demand relations of individual wood industries determined by this profitability. The levels of customer demand exert an influence on the price levels of individual wood grades. They follow the individually shaped timber values accepted by individual entrepreneurs assuming expected levels of operational profitability of processing. Also important is the impact of the current market situation in a given phase of the economic cycle, as well as the technical and organisational levels of a particular wood-processing plant and the activities of sales and procurement services (Stanula et al. 2023a).

An attempt can be made to determine the structure of timber management, to which the market-shaped levels of demand from the wood processing industry for particular grades will follow over time. The most important of the expectations of entrepreneurs is the level of operational profitability in its technical and market conditions. The cost of bringing raw materials from forestry depots to the plant weighs significantly, especially in the recent period, on production costs (Stanula et al. 2023b). With their relatively high level, the value of timber in this case may be lower according to calculations based on the proposed formula. Recovery values from the sale or on-site processing of wood chips and sawdust are also noticeable (Hruzik et al. 2005). The calculated value of wood significantly determines the optimum management of the raw material.

The value added in economic activity achieved in wood processing is determined by subtracting the value of sales revenues from the value transferred, earned in other, preceding processes of processing raw materials and materials. The added values achieved in the considered phase of wood processing can also form the basis for determining the structure of roundwood utilisation, since in macro-scale analyses, these values make up this basic measure of the level of economic development. The high added value generated in the enterprise is distributed among employees, the budget, the financing of contributions charged to personnel costs, various mandatory benefits and, most importantly from the point of view of the economic entity, net profit. However, the inclusion of added value in the timber management account will not provide a fully accurate determination of the structure of the demand for particular grades, as opposed to the value

---

of timber. The value of timber will certainly be influenced by the future structure of raw material prices, which, of course, would have to be determined in further work on the model.

Measures of roundwood value, value added in processing and efficiency indicators can therefore be used in the proposed method of raw material management account acting as functions of the econometric criterion.

Thus, it can be concluded that the timber value criterion will be the main factor shaping changes in demand for roundwood of various qualitative-dimensional grades and species limiting their growth. However, the maximisation of the objective function is limited by a number of more or less important conditions that can be described by relevant equations. Among the most important are:

- supply of individual wood grades and species,
- demand for wood.

The supply of roundwood is determined by the forest farms offering it, and in the case of Poland, mainly the State Forests, while demand is driven by the needs of the market for materials and semi-finished products and wood products. It is also related to the technological level and processing capacity of particular industries and enterprises.

The need for rational management of timber, also in terms of volume with forecasts, is indicated as the most important element of forest-timber cooperation by the timber circles, as well as central authorities. This implies the need for strict control of flows within the national economy. It can be expected that the timber market will, to some extent, shape the profitable structure of timber utilisation, although the significant influence of the policy of the State Forests pursuing multiple objectives of maintaining stands cannot be overlooked.

## CONCLUSIONS

Wood processing technology and the structure and size of sawmills at the current stage in Poland have little impact on the efficiency of lumber and wood product production.

Technological processes in the wood industry are directly related to the production mix, but the efficiency of its production, due to the dominant share of raw material costs, depends critically on the price relationship between raw material and products, as in between raw material and products, both in the local market and in the European market.

---

The efficiency of wood processing for lumber and sample lumber products is currently at about 60%. The efficiency of production of selected elements and sets (products) of pine pallet type is at  $Epc=135-161\%$  in 2023, thanks to the added value of by-products.

Timber value accounting from the point of view of profitability of processing can be applied to determine the direction of changes in the demand structure for roundwood.

The criterion of added value in processing, as well as the efficiency relationship, can be used in the study of the management structure of a limited supply of wood, for example in multi-plant enterprises.

#### REFERENCES

- Bidzińska, G., Ratajczak, E. 2003. Polska – UE: wpływ integracji na rynek pracy w sektorze leśno-drzewnym. *Przemysł Drzewny*, nr 7-8, s. 8-11.
- Cholewa, T. 2000. System zapewnienia jakości w warunkach rynku europejskiego. *Interkatedra*. Poznań, nr 16/00.
- EN 1611-1:1999/A1:2002 Sawn Timber-Appearance Grading of Softwoods-Part 1: European Spruces, Firs, Pines, Douglas Fir and Larches. Available online: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/69107e18-b016-4b91-b5d1-eeb833e6fe7c/en-1611-1-1999-a1-2002> (Accessed 24 January 2024).
- GUS 2023. Rocznik Statystyczny Leśnictwa 2023. ISSN 2956-8366, Warszawa, Białystok 2023. [https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5515/13/6/1/rocznik\\_statystyczny\\_leśnictwa\\_2023.pdf](https://stat.gov.pl/download/gfx/portalinformacyjny/pl/defaultaktualnosci/5515/13/6/1/rocznik_statystyczny_leśnictwa_2023.pdf) (Accessed 24 January 2024)
- Górna, A., Szabelska-Beręsewicz, A., Wieruszewski, M., Starosta-Grała, M., Stanula, Z., Koźuch, A., Adamowicz, K. 2023 Predicting Post-Production Biomass Prices. *Energies*, 16, 3470. <https://doi.org/10.3390/en16083470>
- Hruzik, G. J., Wieruszewski, M., Gotycz, W. 2000. Analiza efektywności produkcji tarcicy iglastej metodą symulacji komputerowej. W: *Drewno – materiał wszechczasów*. Materiały 14 konferencji naukowej WTD-SGGW. Warszawa, s. 107-114.
- Hruzik, G., Gotycz, W., Wieruszewski, M., 2005. Efektywność produkcji przykładowych wyrobów tartacznych na rynek krajowy i europejski, *Przemysł Drzewny*, nr 5,

- <https://www.drewno.pl/> (Accessed 24 January 2024)
- <https://www.e-drewno.pl/stock/> (Accessed 24 January 2024)
- Jabłoński, K. 2000. Koopetycja w przemyśle drzewnym. W: Przemysł tartaczny: kooperacja i konkurencja. Materiały konferencji naukowej. Porażyn – Poznań, s. 1-19.
- Krzosek, S. 2003. Czy polscy tartacznicy powinni obawiać się europejskich tartaków gigantów. *Rynek Drzewny*. Poznań, nr 3, s. 22-23.
- Kupčák, V., Pek, R. 2015. The Level of the Wood Raw Material Base Processing in the Czech Republic. *Procedia Econ. Financ.*, 34, 557–564. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01668-8](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01668-8).
- Lis, W., Popyk, W., Tabert, M. 2000. Warunki i możliwości rozwoju małych i średnich przedsiębiorstw PD w Polsce na tle wymagań UE. *Interkatedra*. Poznań, nr 16/00.
- Mydlarz, K., Wieruszewski, M. 2022. Economic, Technological as Well as Environmental and Social Aspects of Local Use of Wood By-Products Generated in Sawmills for Energy Purposes. *Energies*, 15, 1337. <https://doi.org/10.3390/en15041337>
- PN-EN ISO 9001:2015-10 Systemy zarządzania jakością -- Wymagania
- Stanula, Z., Wieruszewski, M., Mydlarz, K., Adamowicz, K. 2023a. Fuel Use Reduction and Economic Savings from Optimization of Road Transportation of Coniferous Roundwood. *Energies*, 16, 5334. <https://doi.org/10.3390/en16145334>
- Stanula, Z., Wieruszewski, M., Zydrón, A., Adamowicz, K. 2023b. Optimizing Forest-Biomass-Distribution Logistics from a Multi-Level Perspective—Review. *Energies*, 16, 7997. <https://doi.org/10.3390/en16247997>
- Wieruszewski, M., Trociński, A., Kawalerczyk, J. 2020. The Effect of Raw Material Selection on Material Efficiency Indicators in Large-Sized Roundwood Processing. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar*, 19, 105–112. <https://doi.org/10.17306/J.AFW.2020.2.11>.
- Wieruszewski, M., Turbański, W., Mydlarz, K., Sydor, M. 2020. Economic Efficiency of Pine Wood Processing in Furniture Production. *Forests*, 14, 688. <https://doi.org/10.3390/f14040688>