

POLITECHNIKA POZNAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ



Mgr inż. Michał Zawada

Rozprawa doktorska

**Badanie cech geometrycznych elementów skrawających
glebę z zastosowaniem automatycznych systemów
sterowania maszynami rolniczymi**

Promotor: **Prof. dr hab. inż. Stanisław Legutko, dr h.c., prof. h.c.**
Promotor pomocniczy: **Dr inż. Roman Rogacki**

Poznań 2024

Oświadczenie o zgłoszeniu patentowym

Niniejsza rozprawa doktorska zawiera materiały, rozwiązania oraz koncepcje będące przedmiotem zgłoszenia patentowego złożonego do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Wszelkie prawa do wyników badań oraz innowacji przedstawionych w pracy są zastrzeżone zgodnie z obowiązującymi przepisami prawa patentowego.

Oświadczenie o finansowaniu badań

Badania zostały przeprowadzone w ramach Programu Doktorat Wdrożeniowy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego realizowanego w latach 2020–2024 w ramach umowy nr DWD/4/22/2020.

Podziękowania

Pragnę wyrazić serdeczne podziękowania moim Promotorom, których wsparcie, cenne wskazówki oraz nieoceniona wiedza były kluczowe w realizacji tej pracy.

Podziękowania kieruję także do mojej rodziny, w szczególności mojej żony za nieustające wsparcie, cierpliwość i wiarę we mnie na każdym etapie realizacji doktoratu.

SPIS TREŚCI

STRESZCZENIE	8
SUMMARY	8
WYKAZ AKRONIMÓW, SYMBOLI I OZNACZEŃ	9
1. Wstęp	11
1.1. Wprowadzenie	11
1.2. Geneza pracy i uzasadnienie wyboru tematu.....	13
1.3. Zakres pracy	13
2. Analiza stanu zagadnienia w świetle literatury	15
2.1. Wprowadzenie	15
2.2. Czynniki determinujące innowacje i rozwój metod pielęgnacji upraw	15
2.2.1. Czynniki polityczno-środowiskowe	15
2.2.2. Czynniki społeczno-ekonomiczne	18
2.2.3. Czynniki technologiczne.....	20
2.1. Podział gleb uprawnych w odniesieniu do oporów skrawania	24
2.2. Erozja wodna gleb	33
2.3. Problematyka tematu w kontekście agrotechnicznym.....	38
2.3.1. Metody pielęgnacji upraw rzędowych.....	38
2.3.2. Podział nośników maszyn rolniczych do uprawy gleby	45
2.3.3. Problematyka pielenia mechanicznego.....	49
2.3.4. Podział i charakterystyka narzędzi do pielenia mechanicznego	51
2.3.5. Geometria narzędzi stosowanych w pielnikach rzędowych w kontekście oporu ruchów skrawania gleby	53
2.3.6. Metody korekcji położenia narzędzi zwiększających wydajność.....	62
2.3.7. Identyfikacja kluczowych parametrów pielenia	67
2.4. Metody wyznaczania obciążeń narzędzi.....	70

2.4.1.	Metody teoretyczne	70
2.4.2.	Metody numeryczne	76
2.4.3.	Metody eksperymentalne	81
3.	Podsumowanie stanu zagadnienia oraz cele pracy	85
3.1.	Uzasadnienie podjęcia tematu	85
3.2.	Problematyka naukowa oraz luka badawcza	86
3.3.	Cele pracy	88
3.4.	Hipotezy badawcze	88
4.	Model badawczy czujnika do analizowania obciążeń narzędzi pielęgnacyjnych	89
4.1.	Wprowadzenie	89
4.2.	Dane wejściowe oraz podstawy teoretyczne	91
4.3.	Budowa i zasada działania czujnika	92
4.4.	Metoda badawcza - kalibracja czujników	101
4.5.	Kalibracja metodą macierzy odwrotnej	106
4.6.	Dokładność pomiarowa	111
4.7.	Podsumowanie	112
5.	Model badawczy mechatronicznej sekcji pielęgnacyjnej i narzędzia	113
5.1.	Specyfikacja funkcjonalna urządzenia	113
5.2.	Narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających	114
5.3.	Mechatroniczna sekcja pielęgnacyjna	124
5.4.	Podsumowanie i wnioski	127
6.	Przeciwdziałanie erozji wodnej gleb	128
7.	Wyniki badań i ich analiza	131
7.1.	Przedmiot badań	131
7.2.	Metoda badawcza	134
7.3.	Badania właściwości gleby	139

7.4.	Obciążenia narzędzi w funkcji czasu	142
7.5.	Obciążenia w funkcji prędkości jazdy	151
7.6.	Obciążenie w funkcji kątów narzędzia mechatronicznego	154
7.7.	Współczynnik redukcji obciążenia	156
7.8.	Podsumowanie	162
8.	Modelowanie procesu zmniejszania obciążeń w czasie pielenia.....	163
9.	Prace wdrożeniowe	165
9.1.	Szacunkowa wartość rynku rolniczych maszyn uprawowych.....	165
9.2.	Analiza konkurencyjności.....	169
9.3.	Identyfikacja wczesnych klientów	172
9.4.	Analiza strategiczna SWOT projektu	173
9.5.	Kryteria wyceny produktu	177
9.6.	Funkcje maszyny oraz specyfikacja	179
9.7.	Integracja z innymi systemami oraz perspektywy rozwoju.....	181
9.8.	Wariantowość zastosowań	182
9.9.	Zgodności z polityką zrównoważonego rozwoju	183
9.10.	Podsumowanie i perspektywy wdrożeniowe	184
10.	Wnioski końcowe	185
10.1.	Wnioski dotyczące hipotez pracy	185
10.2.	Wnioski poznawcze	185
10.3.	Wnioski użyteczne.....	186
10.4.	Wnioski dotyczące dalszych badań	187
11.	LITERATURA	189
12.	SPIS RYSUNKÓW	201
13.	SPIS TABEL.....	210

STRESZCZENIE

Celem niniejszej pracy doktorskiej było opracowanie innowacyjnego narzędzia mechatronicznego do pielenia mechanicznego upraw, które umożliwia zmniejszenie generowanych w czasie procesu obciążeń. Ponadto umożliwia prowadzenie badań w zakresie przeciwdziałania erozji wodnej gleb. Przeprowadzono serię badań porównujących obciążenia występujące na narzędziach standardowym oraz o zmiennej geometrii elementów skrawających w kierunku znalezienia najlepszych ustawień kątów skrawania gleby. Wykazania wpływu zmian geometrii narzędzia oraz prędkości jazdy na uzyskiwane obciążenia wypadkowe na narzędziach. Wyniki badań wskazują, że nowa konstrukcja zmniejsza obciążenia w zależności od przyjętych parametrów oraz warunków glebowych od około 23% do 95% dla wypadkowych sił oraz od 47% do 119% dla momentów wypadkowych, w porównaniu do tradycyjnego narzędzia. Opracowane narzędzie ma potencjał do szerokiego zastosowania w autonomicznych systemach rolniczych, co przyczyni się do bardziej zrównoważonego zarządzania pielęgnacją upraw oraz wydłużenia pracy tych pojazdów na jednym tankowaniu lub ładowaniu baterii.

SUMMARY

The aim of this thesis was to develop an innovative mechatronic tool for mechanical weeding of crops, which would reduce the loads generated during the process. It also allows research to be carried out into the prevention of water erosion in soils. A series of studies have been carried out to compare the loads generated by standard tools and tools with variable blade geometry in order to find the best settings for soil cutting angles. The effects of changes in tool geometry and cutting speed on the resulting loads on the tools were demonstrated. The results show that the new design reduces loads by approximately 23% to 95% for resultant forces and 47% to 119% for resultant torques compared to the traditional tool, depending on the adopted parameters and soil conditions. The developed tool has the potential to be widely used in autonomous farming systems, contributing to more sustainable crop management and extending the operation of these vehicles on a single fuel or battery charge.

WYKAZ AKRONIMÓW, SYMBOLI I OZNACZEŃ

α	–	kąt skrawania, kąt wzniosu narzędzia [$^{\circ}$]
β	–	kąt poprzecznego pochylenia elementów skrawających [$^{\circ}$]
γ	–	kąt roboczy sekcji [$^{\circ}$]
h	–	głębokość pielenia [mm]
κ_{Fw}	–	współczynnik redukcji obciążeń na podstawie sił wypadkowych
$\overline{\kappa_{Fw}}$	–	średni współczynnik redukcji obciążeń na podstawie sił wypadkowych
κ_{Mw}	–	współczynnik redukcji obciążeń na podstawie momentów wypadkowych
$\overline{\kappa_{Mw}}$	–	średni współczynnik redukcji obciążeń na podstawie momentów wypadkowych
φ	–	kąt tarcia zewnętrznego gleby [$^{\circ}$]
ϕ	–	kąt tarcia wewnętrznego gleby [$^{\circ}$]
θ	–	kąt rozwarcia narzędzia [$^{\circ}$]
i	–	kąt zaostrenia noży podcinających [$^{\circ}$]
ε	–	kąt przyłożenia narzędzia [$^{\circ}$]
s	–	wytrzymałość gleby na ścinanie [kPa]
c	–	spójność gleby [kPa]
$tg\phi$	–	współczynnik tarcia wewnętrznego
σ_n	–	naprężenia normalne [MPa]
τ	–	naprężenia styczne [MPa]
F_x	–	siła odczytywana przez czujnik w kierunku x [N]
F_y	–	siła odczytywana przez czujnik w kierunku y [N]
F_z	–	siła odczytywana przez czujnik w kierunku z [N]
F_w	–	siła wypadkowa [N]
M_x	–	moment skręcający odczytany przez czujnik w kierunku x [Nm]
M_y	–	moment skręcający odczytany przez czujnik w kierunku y [Nm]
M_z	–	moment skręcający odczytany przez czujnik w kierunku z [Nm]
M_w	–	moment skręcający wypadkowy [Nm]
a_x	–	przyspieszenia w kierunku x [$m \cdot s^2$]
a_y	–	przyspieszenia w kierunku y [$m \cdot s^2$]

a_z	– przyspieszenia w kierunku z [$\text{m} \cdot \text{s}^2$]
B_{Fx}	– odpowiedź mostka tensometrycznego na siłę w kierunku x
B_{Fy}	– odpowiedź mostka tensometrycznego na siłę w kierunku y
B_{Fz}	– odpowiedź mostka tensometrycznego na siłę w kierunku z
B_{Mx}	– odpowiedź mostka tensometrycznego na moment skręcający w kierunku x
B_{My}	– odpowiedź mostka tensometrycznego na moment skręcający w kierunku y
B_{Mz}	– odpowiedź mostka tensometrycznego na moment skręcający w kierunku z
v	– prędkość jazdy [$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$]

1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Głównymi wyzwaniami dla nowoczesnego rolnictwa jest sprostanie wymaganiom rosnącego zapotrzebowania na żywność przy jednoczesnym oczekiwaniu wzrostu ekologiczności stosowanych metod uprawy i pielęgnacji. Oczekiwania te dotyczą zarówno ograniczania stosowania środków ochrony roślin, zmniejszania ilości aplikowanych nawozów sztucznych oraz wdrażania metod zmniejszających energochłonność procesów. Kluczowym kryterium powiązanim ze wspomnianymi czynnikami są działania mające na celu przeciwdziałanie zbytniemu oddawaniu zmagazynowanej w glebie wody oraz rozwijanie w ten sposób, w połączeniu z odpowiednim zmianowaniem upraw, bioróżnorodności gleby, a tym samym jej żyzności.

Oprócz wymienionych wyzwań związanych typowo z zagadnieniami agrotechnicznymi należy spojrzeć również na problem od strony technologicznej. Systemy rolnictwa precyzyjnego, czy rolnictwa 4.0 są narzędziami umożliwiającymi rolnikom sprostanie części wymienionych wymagań. Obszary badawcze w tych zagadnieniach dotyczą głównie poszukiwania sposobów dostosowywania procesów do lokalnych warunków glebowych. Mapy aplikacyjne dostarczające tych informacji w odniesieniu do informacji o położeniu geograficznym są generowane, w standardzie, na podstawie badań zasobności gleby z pobranych na polach próbek. Poszukuje się alternatyw dla tej czasochłonnej metody umożliwiających wnioskowanie o rodzajach gleb w oparciu o czujniki montowane na maszynach rolniczych lub na podstawie zdjęć satelitarnych. Nowoczesne technologie ukierunkowane są również na zbieranie danych na temat różnych parametrów procesu oraz wnioskowanie na ich podstawie w celu zwiększania opłacalności i ekologiczności. Naturalnymi zastosowaniami tych systemów są autonomiczne pojazdy rolnicze, których rozwój na przestrzeni ostatnich lat znacząco wzrósł. Raporty branżowe wskazują na to, że trend rozwoju tych maszyn będzie dalej się rozwijał z uwagi na problemy kadrowe gospodarstw oraz rosnący poziom automatyzacji produkcji. Autonomia w rolnictwie znajduje głównie zastosowanie w zakresie siewu oraz pielęgnacji upraw czyli zabiegów agrotechnicznych niewymagających napędów dużej mocy. Mimo tego, problematyka energochłonności w maszynach posiadających swój napęd jezdny oraz niewymagających obsługi operatora, jedynie jego nadzór, jest istotna ponieważ dąży się aby roboty rolnicze mogły wykonywać pracę nieprzerwanie jak najdłużej.

Z drugiej strony źródła energii w zależności od zastosowanego rodzaju napędu elektrycznego lub spalinowego mogą stanowić większość kosztów takich maszyn – w szczególności jeśli istnieje konieczność stosowania baterii. Oprócz problematyki bezpieczeństwa takich maszyn, ich sposobów i dokładności pozycjonowania na polu problematykę badawczą stanowi wydłużanie ich czasu pracy co wpływa na opłacalność i wydajność.

Pielenie mechaniczne jest metodą stosowaną z powodzeniem od lat, która na długi czas została wyparta na korzyść chemicznych sposobów usuwania chwastów. Ponowne wdrażanie tej metody wynika głównie z konieczności sprostania wymaganiom ustawowo nakazującym ograniczać stosowanie herbicydów. Prowadzone badania skupiają się na rozwoju precyzji oraz dokładności pozycjonowania narzędzi pielęgnujących względem upraw rzędowych. W tym celu jednostki badawcze i przemysłowe prowadzą badania w zakresie automatycznego wykrywania roślin, najczęściej przy użyciu wizyjnych systemów oraz na tej podstawie automatyczne sterowanie pozycją maszyn i narzędzi względem roślin. Zamierzonymi efektami są polepszona ergonomia pracy operatorów ciągników, większa wydajność przy zmniejszonych stratach upraw. Istotnym czynnikiem dla pielenia mechanicznego jest również dobranie narzędzi skrawających glebę spośród wielu dostępnych na rynku wariantów. Przeobrażanie maszyn lub dostosowywanie ich do pracy w polu jest czasochłonne i często problematyczne. Na ich działanie mają wpływ parametry glebowe w tym typ, wilgotność oraz zagęszczenie – często koniecznym jest wprowadzanie korekt do ustawień w czasie pielenia na polu, co dodatkowo wydłuża proces szczególnie w przypadku zmienności wymienionych parametrów w obrębie jednego pola, wynikających z mozaikowości gleb, czy ukształtowania terenu. Jednym z kluczowych wyzwań współczesnego rolnictwa jest również przeciwdziałanie zjawiskom erozji. Uprawy rzędowe w połączeniu z pochyleniem terenu sprzyjają erozji wodnej ponieważ prowadzą do kształtowania strumieni wody z opadów sprzyjając wypłukiwaniu gleby oraz roślin. Prowadząc badania nad rozwojem ekologicznych metod pielenia zdefiniowano wymienione wcześniej problemy badawcze, które skłoniły do szczegółowego przeanalizowania ich oraz próby znalezienia na nie rozwiązania.

1.2. Geneza pracy i uzasadnienie wyboru tematu

Wybór tematu pracy wynika z rosnącej potrzeby opracowania narzędzi rolniczych, które nie tylko zwiększają wydajność pielęgnacji upraw, ale także zmniejszają degradację gleby, w tym erozję. Dotychczasowe badania skupiają się na problematyce pozycjonowania narzędzi pielęgnacyjnych względem upraw zwiększając prędkość wykonywanych zabiegów ale pomijając kwestie ich dostosowywania pod parametry procesu, generując w ten sposób straty energii napędzającej pojazdy będących ich nośnikami. Znaczący rozwój metod ekologicznego odchwaszczania wynika głównie z programów promujących metody neutralne dla środowiska, należy więc spodziewać się rosnącego zapotrzebowania na pielniki mechaniczne. Adaptacja tych metod odchwaszczania na autonomicznych pojazdach, których działanie zakłada możliwość ciągłego ich stosowania na polach jest naturalnym krokiem. Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny prowadzi w tym zakresie badania, co było bezpośrednim czynnikiem wpływającym na podjęcie się tematu doktoratu. Jego głównym celem jest zaprojektowanie nowoczesnego narzędzia, które zmniejszy obciążenia generowane w czasie pielenia upraw przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej efektywności operacyjnej. Przełoży się to na wydłużenie pracy robotów polowych oraz polepszenie efektywności energetycznej a finalnie zwiększy opłacalność stosowania robotów polowych.

1.3. Zakres pracy

Zakres pracy obejmuje opracowanie mechatronicznej sekcji pielęgnującej dla upraw rzędowych wyposażonej w narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających oraz ocenę jej efektywności w warunkach polowych. Badania przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym wyposażonym w szereg czujników do analizowania obciążeń dla dwóch przypadków narzędzi: standardowego i mechatronicznego. Badaniom podlegało wykazanie wpływu zmiany kątów skrawania oraz prędkości na generowane obciążenia oraz znalezienie najlepszych nastaw pod występujące na polu warunki glebowe. Na tej podstawie dokonano porównania wyników oraz wykazania w formie współczynników różnic między narzędziami. Badania eksperymentalne poprzedziła analiza literatury, która wskazuje na czynniki determinujące innowacje w zakresie metod pielęgnacji upraw. Przytoczono podział gleb uprawnych w odniesieniu do oporów skrawania oraz przeanalizowano problematykę erozji wodnej gleb. W celu sprostania wymaganiom

nowoczesnych maszyn rolniczych przeanalizowano szczegółowo problematykę doktoratu w kontekście agrotechnicznym. Podsumowano dotychczasowo stosowane w stanie techniki rozwiązania do pielenia mechanicznego. Przenalizowano możliwe sposoby wyznaczania obciążeń oraz zdecydowano na tej podstawie o prowadzeniu eksperymentalnych badań polowych. Dokonany przegląd literatury doprowadził do postawienia celów i hipotez badawczych, które następnie udowodniano, dzięki wypracowanej metodyce. Przytoczono oraz scharakteryzowano szczegółowo zasadę działania mechatronicznej sekcji oraz narzędzia o zmiennej geometrii. Prowadzone testy polowe dostarczyły danych, które zaprezentowano w formie wykresów oraz analiz wykazujących spełnienie założeń doktoratu. Realizowany doktorat wdrożeniowy wymagał dokonania niezbędnych analiz zapotrzebowania rynkowego na efekty prowadzonych badań w celu uzyskania jak największej atrakcyjności komercyjnej opracowanej metody oraz urządzenia. Ogół opisanych prac przyczynił się do zredagowania wniosków końcowych z procentowym wykazaniem różnic w generowanych przez narzędzia obciążeniach.

Praca składa się z dziesięciu rozdziałów, w tym wprowadzenia, przeglądu literatury, metodyki, nakreślenia celów badawczych, opisu zaprojektowanej konstrukcji wraz z jej cechami funkcjonalnymi. Opisano sposoby modelowania zmniejszania obciążeń, różne podejścia do przeciwdziałania erozji wodnej gleb. Zaprezentowano wyniki z podziałem na czynniki wpływające na obciążenia, opisano przeprowadzone prace o charakterze wdrożeniowym oraz podsumowano doktorat wnioskami końcowymi. W pracy zawarto streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści oraz wykazy tabel i rysunków.

2. Analiza stanu zagadnienia w świetle literatury

2.1. Wprowadzenie

W rozdziale przedstawiono analizę stanu wiedzy w odniesieniu do problematyki tematu - mechatronicznej sekcji pielęgnującej umożliwiającą zmniejszanie oporów skrawania w czasie wykonywania zabiegu. Nakreślono czynniki, które determinują ciągły rozwój metod pielęgnacji upraw oraz wpływających na szukanie innowacji w tym zakresie. Mając na uwadze główny cel pracy przytoczono aspekty związane z pielęgnacją upraw rzędowych, nakreślając ogólną problematykę tematu, podkreślając istotność prowadzonych badań. Skupiono się na podsumowaniu znanych metod usuwania chwastów w uprawach, scharakteryzowano najnowsze wyzwania stawiane maszynom i systemom rolniczym w kontekście opracowanej metody. Ponadto przeanalizowano literaturę związaną bezpośrednio z prezentowaną w pracy problematyką badawczą identyfikacji obciążeń zaprojektowanego narzędzia na potrzeby ich zmniejszania poprzez zmianę geometrii elementów skrawających. Przytoczono publikacje wnoszące nowe elementy wiedzy z zakresu procesu pielenia mechanicznego ale również podsumowano obecny stan wiedzy dotyczący metod symulacji oraz matematycznego opisu procesów skrawania gleby.

2.2. Czynniki determinujące innowacje i rozwój metod pielęgnacji upraw

2.2.1. Czynniki polityczno-środowiskowe

Głównymi czynnikami determinującymi rozwój i poszukiwanie nowych metod pielęgnacji roślin są programy Unii Europejskiej obejmujące wspieranie wszelkich metod promujących neutralność ekologiczną dla społeczeństwa i środowiska. Czynniki polityczno-środowiskowe zostały połączone w jedną kategorię ponieważ są one ze sobą ściśle powiązane w ramach proponowanych programów normalizujących politykę agrarną, obrazując kierunek dalszych działań dotyczących rolnictwa.

W 2019 roku Komisja Europejska przedstawiła *Europejski Zielony Ład*, który zakłada całkowitą neutralność dla środowiska poprzez zaprzestanie stosowania technik toksycznych dla otoczenia wpływających na jakość powietrza, wody, gleby oraz produktów konsumpcyjnych. W maju 2021 roku Komisja Europejska przyjęła plan działań mający na celu eliminację

zanieczyszczeń wody, powietrza i gleby. Plan ten prezentuje spójną wizję działań do roku 2050, w którym poziomy zanieczyszczeń środowiska są zredukowane do bezpiecznych poziomów dla zdrowia ludzkiego i ekosystemów. Dokument ten integruje różne istniejące polityki Unii Europejskiej w obszarze ochrony środowiska, a także zakłada przegląd obowiązującego unijnego prawodawstwa w celu skuteczniejszego wdrażania środków mających na celu redukcję zanieczyszczeń [1,2]. Dla rolników oznacza to konieczność transformacji i przystosowania gospodarstw do nowych wytycznych – szczególnie w zakresie ograniczania stosowania środków ochrony roślin w tym herbicydów. W celu ułatwienia wdrażania założeń programowych Europejskiego Zielonego Ładu oraz uszczegóławiania działań wprowadzono szereg innych strategii np. *strategię od pola do stołu*.

Zakłada ona kompleksowe podejście do wyzwań związanych ze zrównoważonymi systemami żywnościowymi i podkreśla istotę powiązań między zdrowiem ludzi, zdrowiem społeczeństwa a zdrowiem planety. Dokument ten stawia ambitne cele, w tym redukcję zużycia pestycydów, antybiotyków i nawozów, a także zwiększenie udziału rolnictwa ekologicznego [3]. Według niego badania naukowe i innowacje stanowią kluczowe czynniki przyspieszające transformację w kierunku zrównoważonych, zdrowych i sprzyjających wyłączeniu społecznemu systemów żywnościowych, poczynając od produkcji pierwotnej, aż po konsumpcję. Dzięki badaniom naukowym i innowacjom możliwe jest opracowanie, przetestowanie oraz implementacja nowatorskich rozwiązań, pokonanie istniejących barier oraz odkrycie nowych perspektyw rynkowych w obszarze żywności i rolnictwa [4].

Przytoczone założenia programów propagujących ekologiczne uprawy niesie ze sobą wiele ryzyka związanego z ich wdrażaniem oraz osiągnięciem zakładanych celów. 2 grudnia 2021 r. doszło do formalnego przyjęcia porozumienia dotyczącego reformy *Wspólnej Polityki Rolnej (WPR)*, a nowe przepisy weszły w życie 1 stycznia 2023 r. Zmiany te mają na celu ustanowienie bardziej sprawiedliwej, ekologicznej i wynikowej polityki rolniczej. Reforma ma za zadanie stworzyć podstawy dla zrównoważonej przyszłości dla europejskich rolników, skoncentrowanego wsparcia dla mniejszych gospodarstw oraz umożliwienia państwom członkowskim większej elastyczności w dostosowywaniu środków do lokalnych warunków. WPR na lata 2023–2027 ma stanowić istotne narzędzie w realizacji strategii „Od pola do stołu” oraz strategii na rzecz różnorodności biologicznej. Do głównych celów programu należą spójność z programami przeciwdziałającymi zmianom klimatu przy wspieraniu i zapewnianiu godziwych dochodów rolnikom. Duży nacisk kładziony jest na ochronę żywności i zdrowia

oraz promowanie transferu wiedzy i innowacji w celu dynamicznego rozwoju obszarów wiejskich [5,6].

W ramach Planu Strategicznego dla Wspólnej Polityki Rolnej 2023-2027 wprowadzono pięć *Ekoschematów* będących dobrowolnym, pro-środowiskowym elementem płatności bezpośrednich dla rolników. Koniecznym jest jednak przestrzeganie ściśle określonych wytycznych dotyczących prowadzenia upraw. *Ekoschemat: Rolnictwo węglowe i zarządzanie składnikami odżywczymi* jest programem najlepiej wpisującym się w tworzenie wytycznych co do pielęgnacji upraw rzędowych, których dotyczy temat doktoratu. W ramach wspomnianego programu opracowano osiem praktyk, od których uzależniono wielkość dopłat dla gospodarstw. Pielenie mechaniczne zgodne z założeniami rolnictwa zrównoważonego i ekologicznego może być czynnikiem minimalizującym stosowanie pestycydów i tym samym być powodem do ubiegania się o wsparcie z tytułu prowadzenia gospodarstwa ekologicznego [7,8]. Cechą łączącą wymienione programy jest dbałość o środowisko naturalne, przeciwdziałanie zmianom klimatu oraz ochrona gleb w tym propagowanie świadomego zarządzania gospodarką wodną pól, ograniczanie stosowania herbicydów oraz stawianie na edukację i nowoczesne technologie, które mają na celu ułatwić adaptację zmian.

Niniejszy rozdział ma na celu zobrazowanie czynników, które po części skłoniły autora do podjęcia problematyki tematu doktoratu. Podjęte przez Unię Europejską kroki legislacyjne są odpowiedzią na wyzwania zidentyfikowane dla współczesnego rolnictwa związane ze zmianami klimatycznymi czy następstwami dotychczasowych trendów. Jednym z największych wyzwań jest dążenie do zwiększenia bioróżnorodności gleby oraz magazynowania w niej wody poprzez zastosowanie odpowiednich metod upraw i pielęgnacji roślin. Można do nich zaliczyć metody uprawy uproszczonej, które zakładają rezygnację z wykonywania orki. Pozostawianie resztek poźniwnych zmniejsza parowanie wody poprzez ograniczenie nagrzewania powierzchni gruntu, dodatkowo zatrzymując ruchy kapilarne wody. W przypadku upraw rzędowych dzięki stosowaniu pielenia mechanicznego możliwe jest przerywanie ruchów kapilarnych wody zmniejszając jej parowanie do atmosfery. Dodatkowo dzięki ścinaniu skorupy glebowej z powierzchni gleby polepsza się warunki wodno-powietrzne podłoża oraz usuwa się chwasty [9,10].

Kolejnym czynnikiem środowiskowym wpływającym na rozwój metod mechanicznego pielenia jest dotychczasowe powszechne stosowanie pestycydów, czego następstwem jest uodpornienie się chwastów na herbicydy przyczyniając się do powstania odmian chwastów

odpornych na chemiczne metody zwalczania ich. Jak podaje Międzynarodowa Baza Danych Chwastów Odpornych na Herbicydy obecnie istnieje 530 unikalnych przypadków (gatunek x miejsce działania) chwastów odpornych na herbicydy na całym świecie, z 272 gatunkami (155 dwuliściennych i 117 jednoliściennych) [11–13].

Z drugiej strony wprowadzana polityka rolna może powodować szereg obaw i ryzyk (uzasadnionych ekonomicznie) przed którymi stoją rolnicy we wszystkich krajach Unii Europejskiej – czynniki te opisano szerzej w następnym podrozdziale.

2.2.2. Czynniki społeczno-ekonomiczne

Niewątpliwym czynnikiem determinującym rozwój oraz poszukiwanie innowacyjnych metod pielęgnacji upraw jest rolnictwo ekologiczne, które z założenia nie dopuszcza stosowania metod chemicznego zwalczania chwastów [14]. Rosnące zainteresowanie konsumentów produktami uprawianymi całkowicie ekologicznie wg przytoczonych raportów wykazuje również spadek liczby gospodarstw ekologicznych w Polsce. Sytuacja powoli ulega polepszeniu, jednak niewspółmiernie do rosnącej sprzedaży żywności i produktów ekologicznych [15–17]. Przyczyn można upatrywać się w restrykcyjnych przepisach dotyczących certyfikacji żywności ekologicznej oraz wspomnianych wyzwań technologicznych.

Alternatywnym systemem zarządzania gospodarstwem jest rolnictwo zrównoważone, które jest znacznie mniej restrykcyjne pod względem wymagań technologicznych. Według definicji Polskiego Stowarzyszenia Zrównoważonego Rolnictwa i Żywności [18] jest to ogół działań ograniczających wpływ rolnictwa na środowisko przy zachowaniu opłacalności dla gospodarstwa. Składa się ono z trzech głównych elementów:

- zrównoważonej ekonomii rozumianej przede wszystkim jako opłacalność i stabilność finansowa, która ma być zapewniona prowadzeniem dobrze przemyślanej strategii opracowanej na podstawie danych na temat nakładów i dochodów, których zrównoważenie możliwe jest dzięki optymalizacji procesów produkcji i dystrybucji. Zrównoważona ekonomia to także budowanie żyzności gleby oraz inwestowanie w nowe technologie w celu spełnienia wymagań konsumentów oraz producentów żywności.

- Bezpieczeństwa środowiska wynikającego ze zrównoważonych praktyk rolniczych mając na celu ochronę: gleby, wody, powietrza oraz bioróżnorodności. Stosowane metody upraw mają na celu odbudowywanie naturalnych procesów biologicznych oraz przeciwdziałanie niszczeniu gleb na skutek np. erozji, zanieczyszczeń, a także wspieranie wiązania dwutlenku węgla w glebie przyczyniając się do zmniejszenia zmian klimatycznych.
- Akceptacji społecznej w szczególności przez ludność lokalną oraz produkcję zgodną z obowiązującymi przepisami i możliwie najlepszymi metodami chroniąc lokalne środowisko.

Poszukiwanie nowoczesnych i zgodnych ze środowiskiem naturalnym metod pielęgnowania upraw to jeden z czynników wpływających na rozwój popularności produkcji zrównoważonej. Stosowanie mechanicznych metod pielenia połączone ze zmniejszeniem oddziaływania na środowisko poprzez redukcję emisji gazów cieplarnianych możliwe jest między innymi poprzez zmniejszenie oporów roboczych generowanych w czasie pielenia. Pielenie mechaniczne wpisuje się również w postulat ograniczenia wpływu rolnictwa na środowisko naturalne oraz pozytywnie wpływa na ograniczanie skutków suszy [19,20].

Istotnymi elementami czynników społeczno-ekonomicznych wpływających na rozwój metod pielęgnacji upraw są edukacja w kierunku zastępowania metod rolnictwa konwencjonalnego w tym szerokiego stosowania herbicydów zwalczających chwasty, innymi, przyjaznymi środowisku metodami, które mogą również pozytywnie wpłynąć na inne aspekty w tym budowę bioróżnorodności gleby. Koniecznym jest prowadzenie dalszych badań z zakresu identyfikacji stopnia opłacalności, wydajności i efektywności nowych metod.

Ważnym zagadnieniem mającym wpływ na powszechność wprowadzania zmian w zarządzaniu gospodarstwami oraz sposobami upraw są inwestycje w nowe technologie, w szczególności nowy park maszynowy. Pojawia się jednak pewna trudność związana z praktycznym stosowaniem najnowszych osiągnięć techniki przez rolników – wysokie ceny nowoczesnych maszyn są jedną z głównych przyczyn. Transformacje technologiczne wiążą się również z przemianami społecznymi czyli pełnym rozumieniem nowoczesnych systemów. W innym przypadku nie będą one wykorzystywane w pełni lub co gorsza będą stosowane w nieprawidłowy sposób. Termin opisujący wspomniane problemy z adaptacją nowoczesnych technologii nazywany jest *długiem technologicznym* [21–23]. Jedną z odpowiedzi jest zmniejszanie kosztów nowoczesnych maszyn ale przede wszystkim tworzenie przyjaznych

w obsłudze systemów rolniczych, zmniejszając w ten sposób wykluczenie technologiczne społeczeństwa.

Nowoczesne technologie mogą okazać się odpowiedzią na część wyzwań stawianych rolnictwu, muszą być one jednak w odpowiedni sposób dostosowane do operatorów, jedną z odpowiedzi może być automatyzacja. Kolejny podrozdział wyjaśnia jakie czynniki technologiczne mogą być inspiracją dla innowacji w zakresie pielęgnacji upraw.

2.2.3. Czynniki technologiczne

Rolnictwo precyzyjne

Dokonanie charakterystyki obecnie stosowanych maszyn rolniczych ukierunkowanych na wykonywanie zabiegów skrawających glebę wymaga zrozumienia współczesnych trendów panujących w agrotechnice. Poniższe rozdziały przybliżą główne kierunki rozwoju rolnictwa XXI wieku.

Zrozumienie istoty rolnictwa precyzyjnego najlepiej wytłumaczyć przytaczając skróconą historię rozwoju współczesnego rolnictwa. Po rewolucyjnej mechanizacji przyszedł czas na dalsze zwiększanie wydajności plonów. Nastąpił gwałtowny rozwój bioinżynierii. Zaczęto stosować na szeroką skalę sztuczne nawozy oraz pestycydy. Pod koniec lat 50-tych XX wieku zrozumiano, że dalsze zwiększanie wydajności plonów poprzez dostarczanie składników pokarmowych do gleby jest niewystarczające i zaczęto prowadzić prace nad opracowaniem nowych odmian roślin. Jednocześnie rosła coraz bardziej świadomość ekologiczna, rozumiano, że nadmierne nawożenie powoduje niekorzystne akumulowanie pozostałości nawozów w roślinach oraz przedostawanie się ich do środowiska naturalnego np. do wód gruntowych skażając rozległe tereny. Rolnictwo precyzyjne jest odpowiedzią na poszukiwania złotego środka między dostarczaniem składników pokarmowych a dbaniem o środowisko naturalne oraz o wysoką jakość uprawianych roślin. Idea jest bardzo prosta - dążyć do indywidualnego podejścia do każdej rośliny i stworzyć jej optymalne warunki rozwoju. Równolegle pojawiła się koncepcja *rolnictwa zrównoważonego* - ograniczania odpadów powstałych w czasie zabiegów agrotechnicznych do minimum oraz ograniczanie negatywnego wpływu upraw na tereny pozarolnicze. Według źródeł literaturowych rolnictwo precyzyjne rozpoczęło się razem z upowszechnieniem lokalizowania za pomocą sygnału satelitarnego w zastosowaniach cywilnych [24].

Zatem rolnictwo precyzyjne to gospodarowanie wspomagane komputerowo, oparte głównie na gromadzeniu danych o przestrzennym zróżnicowaniu plonów w obrębie pola [25]. Rejestrowanie danych o wielkości plonów z czujników umieszczonych na maszynie w połączeniu z sygnałem satelitarnego pozycjonowania tworzą mapy obrazujące zróżnicowanie wydajności upraw. Główną ideą jest dostosowanie zabiegów agrotechnicznych np. dawek nawozów do rejonów tego najbardziej potrzebujących zlokalizowanych na wspomnianych mapach. Konieczna jest niezbędna wiedza z zakresu analizowania zapisywanych wyników i umiejętny dobór zabiegów agrotechnicznych.

Kluczowymi elementami rolnictwa precyzyjnego są:

- czujniki wykrywające parametry wykorzystywane do późniejszego mapowania pola np. sensory w kombajnach monitorujące ilość zebranego zboża, czujniki do oceny żyzności gleby, monitorowanie jakości zbieranych zielonek na pasze, itd.
- oprogramowanie komputerowe oraz sterowniki służące do zbierania informacji z wielu czujników jednocześnie, obróbki sygnału oraz przekazywanie ich do modułu zapisującego dane w pamięci,
- specjalistyczny sprzęt pozycjonujący opierający się o sygnał satelitarny np. systemy jazdy równoległej w czasie wykonywania orki, oprysków itd. Wyróżnia się w zależności od ich skomplikowania trzy rodzaje systemu jazdy równoległej: system wspomagania (sygnały przekazywane operatorowi informują o odchyłkach od wytyczonego toru jazdy naprowadzając kierującego pojazdem), półautomatyczny (wymaga montażu obręczy z silnikiem na kierownicy ciągnika - korekcja toru jazdy odbywa się w sposób automatyczny), automatyczny (najdokładniejszy sposób naprowadzania pojazdu, dokładność systemu nawigującego może wynosić nawet +/- 1cm, system korzysta z hydraulicznego układu kierowniczego pojazdu, może wykorzystywać standard ISOBUS do sterowania, umożliwia także w pełni automatyczne wykonywanie uwroci).
- moduł rejestrujący sygnały często zawarty w sterowniku zarządzającym całą maszyną [26].

Wdrażanie postulatów rolnictwa precyzyjnego ma na celu oszczędności związane z selektywnym dawkowaniem środków ochrony roślin i nawozów na podstawie map plonów oraz ochronę środowiska z uwagi na ograniczone ich stosowanie. Dostosowywanie zróżnicowanych dawek na podstawie informacji o rodzaju gleby prowadzi do uzyskania jak najwyższej jakości produktu. Dzięki korzystaniu ze wspomagania prowadzenia maszyny oszczędza się paliwo ponieważ liczba przejazdów jest ograniczona do minimum, unika się także uprawiania tych samych pasów ziemi jednocześnie. Praca z systemami rolnictwa precyzyjnego wyróżnia także ergonomiczne podejście do pracy operatora maszyny. Jest on zwalniany z długotrwałego skupiania się na jednej, żmudnej czynności np. pilnowaniu toru jazdy.

Rolnictwo 4.0

Główną ideą rolnictwa 4.0 jest integracja maszyn rolniczych z cyfrową infrastrukturą gospodarstw. Tworzenie sieci czujników, sterowników i układów wykonawczych komunikujących się ze sobą w celu optymalizacji wykonywanych czynności. Rolnictwo 4.0 zawiera najnowsze rozwiązania techniczne i informatyczne dotychczas zarezerwowane dla przemysłu. W celu rozwijania nowoczesnych trendów konieczne jest spełnienie określonych wymagań np.: łatwy dostęp do Internetu, zapewnienie łączności pomiędzy elementami składowymi systemu oraz modułowość systemów. Wymienione czynniki mają szczególne znaczenie w programach zarządzających gospodarstwem np. 365FarmNet [27]. Część wspomnianych cech rolnictwa 4.0 można zilustrować na przykładzie wspomnianej aplikacji firmy Claas. 365FarmNet to aplikacja do wspomagania zarządzaniem gospodarstwem poprzez zbieranie danych dotyczących produkcji roślinnej i zwierzęcej. Jednym z zastosowań jest planowanie łańcuchów dostaw, tworzenie bazy cen w celu dokonywania analiz pozwalających szukać oszczędności. Aplikacja znajduje także zastosowanie do zarządzania pracą ludzi oraz maszyn rolniczych. Zbieranie danych pozwala na wykonywanie analiz na potrzeby administracyjne związane np. z dopłatami lub bieżącą kontrolę stanów magazynowych gospodarstwa. Stosowana jest do generowania raportów funkcjonowania części składowych gospodarstwa [28]. Modułowość systemów rolnictwa 4.0 oznacza możliwość dokonywania zmian w procesach nawet w czasie wykonywania ich. Zauważalna jest tutaj spójność z głównymi założeniami rolnictwa precyzyjnego, które może być częścią opisywanego trendu.

Drugim kluczowym elementem koncepcji rolnictwa 4.0 jest sterowanie i zarządzanie autonomicznymi pojazdami rolniczymi. Pozycjonowanie samojezdnych robotów rolniczych jest oparte głównie o sygnał GPS oraz korekcję toru jazdy przy użyciu sygnału z kamer. Algorytmy sterujące pojazdem są przetwarzane w komputerze umieszczonym na maszynie i często korzystają z zagadnień sztucznej inteligencji [29]. Rozwój wizji maszynowej to szczególnie zasługa systemów stosowanych w przemyśle, które zostało zaczerpnięte na potrzeby realizacji zagadnień rolniczych oraz jest wciąż doskonałe.

Podsumowując rolnictwo 4.0 w głównej mierze składa się z dwóch zagadnień, których głównymi cechami i wymaganiami są:

- zarządzanie gospodarstwem:
 - konieczność łatwego dostępu do Internetu,
 - modułowa budowa systemu zarządzania - zbieranie i rejestrowanie sygnałów zachodzących w procesach niezwiązanych ze sobą. Zmiana parametrów lub uszkodzenie jednej części systemu nie wpływa na pozostałe.
 - Zapis danych na serwerach w celu wykonywania późniejszych analiz,
 - generowanie raportów umożliwiających analizy pod kątem szukania oszczędności w gospodarstwie,
 - zdalne, szybkie a nawet automatyczne zaopatrywanie gospodarstwa w niezbędne produkty do prawidłowego funkcjonowania - planowanie łańcuchów dostaw,
 - zarządzanie pracą pracowników,
 - zarządzanie pracą maszyn - planowanie zabiegów agrotechnicznych, przeglądów, napraw, wymiany części eksploatacyjnych,
 - tworzenie systemu zarządzania gospodarstwem, którego składowe komunikują się ze sobą ułatwiając kierowanie pracami np. zaplanowanie nawożenia niesie za sobą konieczność zamówienia odpowiedniej ilości nawozów, dawkowanie, zaplanowanie grafiku pracy, sprawdzenie działania rozsiewacza nawozu, kupno paliwa i zatankowanie ciągnika itd.
- sterowanie maszynami rolniczymi:
 - automatyzacja procesów,
 - zastosowanie komputera do wykonywania programu maszyny,

- stosowanie wizji maszynowej do pozycjonowania autonomicznych pojazdów rolniczych lub do naprowadzania narzędzi maszyn np. pielników,
- stosowanie elementów sztucznej inteligencji w wizji maszynowej,
- korzystanie z systemów rolnictwa precyzyjnego,
- tworzenie rojów robotów polowych do wykonywania zabiegów agrotechnicznych - dzięki odpowiedniemu zarządzaniu możliwe jest ciągle wykonywanie pracy,
- ułatwianie pracy rolnika uwzględniając aspekty ergonomiczne,
- zwiększanie wydajności procesów
- szukanie rozwiązań na rosnące problemy kadrowe gospodarstw rolniczych [10,27–29].

Najlepszym podsumowaniem opisanych czynników jest raport firmy Tractica, który przewiduje bardzo szybki i znaczny wzrost zapotrzebowania na roboty rolnicze wyposażone w systemy rolnictwa precyzyjnego i rolnictwa 4.0. Firma zajmująca się badaniami rynku przewiduje wzrost sprzedaży wspomnianych maszyn z około 60 000 sztuk rocznie do ponad 727 000 sztuk w latach 2018-2025. Tractica prognozuje, że rynek sprzedaży robotów polowych do 2025 roku osiągnie wartość 87,9 mld dolarów na całym świecie. Stosowanie automatycznych maszyn rolniczych pozytywnie wpływa na jakość wykonywanych procesów, rozwiązuje problem braków kadrowych w gospodarstwach oraz przede wszystkim wpływa pozytywnie na ograniczenie chemizacji oraz zwiększa wydajność procesów. [10].

2.1.Podział gleb uprawnych w odniesieniu do oporów skrawania

Przeprowadzone rozpoznanie stanu wiedzy i techniki w zakresie stosowanych narzędzi do pielenia mechanicznego wskazywało, że większość z nich do prawidłowej pracy musi być dobierana pod warunki glebowe występujące na polu. Przekłada się to na efektywność narzędzi rolniczych. Znanych jest wiele wyczerpujących i bardzo szczegółowych międzynarodowych klasyfikacji gleb choćby: amerykańska USDA Soil Taxonomy [30], System WRB [31] opracowany przez Międzynarodową Unię Gleboznawczą (IUSS) i wspierany przez Organizację Narodów Zjednoczonych ds. Wyżywienia i Rolnictwa (FAO), klasyfikacja FAO [32], systematyka gleb Polski Polskiego Towarzystwa Gleboznawczego [33] itd. Z punktu widzenia rolnictwa najpowszechniejszym jest podział bonitacyjny czyli określającego jakość gleby pod względem jej wartości użytkowej [34].

Analizowane źródła literaturowe z zakresu teorii i konstrukcji maszyn rolniczych dokonują na podstawie ówczesnych klasyfikacji gleb podziału uwzględniającego opory generowane na narzędziach w czasie mechanicznej uprawy gleby. Jednocześnie zaznaczają, że podziały te są jedynie orientacyjne ponieważ najważniejszym czynnikiem wpływającym na zachowanie gleby w czasie uprawy jest wilgotność oraz zwięźłość. Pierwszy podział, niemiecki, jak podają autorzy opiera się na oporach analizowanych w czasie orki [35]. Przedstawiono go w *tabela 1*.

Tabela 1. Podział gleb z uwagi na opory stawiane narzędziom [35]

<i>Nazwa gleby</i>	<i>Opory stawiane narzędziom</i>	<i>Główne składniki gleby</i>
Grupa I Gleby piaszczyste	lekkie	Piasek Próchniczy piasek Gliniasty piasek Piasek utrzymujący wapno
Grupa II Gleby próchnicze	od lekkich do średnio ciężkich	Próchnica Piaszczysta próchnica Glinkowata próchnica Ilasta próchnica
Grupa III Gleby wapienne (rędziny)	od lekkich do średnio ciężkich	Wapień Piaszczysty margiel Glinkowaty margiel
Grupa IV Gleby gliniaste	od średnio ciężkich do ciężkich	Glina Piaszczysta glina Próchnicza glina Średnio zwięzła glina
Grupa V Gleby ilaste	bardzo ciężkie	Ił, Ilasty margiel Próchniczy ił Ił utrzymujący wapno Bardzo ciężka glina Bardzo ciężki ił

Podobny do powyższego podział zaprezentowano w *tabela 2*, został on dokonany przez Polskie Towarzystwo Gleboznawcze i uwzględnia opory występujące w czasie orki. Zawartość części spławialnych gleby jest wykładnikiem wielkości oporów. Części spławialne są parametrem odnoszącym się do frakcji gleby, które są najłatwiej transportowane przez wodę podczas procesów erozji. Zazwyczaj są to drobne cząstki, takie jak iły, pyły i drobny piasek, które mają małą masę i mogą być łatwo unoszone i przemieszczane przez przepływającą wodę. Proces ten

jest kluczowy w kontekście erozji gleby, ponieważ prowadzi do utraty żyznych warstw gleby, co negatywnie wpływa na jej produktywność i stabilność ekosystemów [36].

Tabela 2. Podział gleb ze względu na opory stawiane narzędziom wg Polskiego Towarzystwa Gleboznawstwa, opracowano na podstawie: [35]

Typ gleby	Opory stawiane narzędziom	Charakterystyka
Kamieniste	Duże	zawierające znaczne ilości kamieni, polodowcowe lub górskie
Gleby żwirowe	Średnie	Zawartość cząstek spławialnych o uziarnieniu $\phi < 0,02$ mm od 0 do 20%
Gleby piaskowe	Małe lub średnie	Zawierające od 0 do 20% cząsteczek spławialnych
Gleby pyłowe	Średnie lub duże	Składają się z pyłów zawierających około 50% cząsteczek spławialnych
Gleby gliniaste	Małe	Silnie spiaszczone zawierające 20-25% cząstek spławialnych
	Małe	Lekkie zawierające 25-35% cząstek spławialnych
	Średnie	Średnie zawierające 35-50% cząstek spławialnych
	Duże	Ciężkie zawierające ponad 50% cząstek spławialnych
Gleby ilaste	Bardzo duże	Zawierają ponad 50% cząsteczek spławialnych

Typ gleby ma ogromne znaczenie na wartości generowanych obciążeń. Jak podaje przytoczone źródło [37] podstawy wiedzy na temat wytrzymałości mechanicznej gleby przypisuje się Coulombowi (1776), który w swoich badaniach dowiódł, że parametrami decydującymi o ostatecznej wytrzymałości na ścinanie gleby są: tarcie oraz spójność (kohezja). W pierwszym przypadku część wytrzymałości na ścinanie jest proporcjonalna do ciśnienia działającego prostopadle do powierzchni ścinania. W drugim przypadku część siły oporowej wobec ruchu ścinającego jest stała, niezależnie od działającego ciśnienia normalnego. Całkowita wytrzymałość na ścinanie gleby jest sumą tych dwóch składników i jest wyrażona równaniem:

$$s = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi, \text{ gdzie:} \quad 2.1$$

s - wytrzymałość na ścinanie (ostateczna siła ścinająca na jednostkę powierzchni),

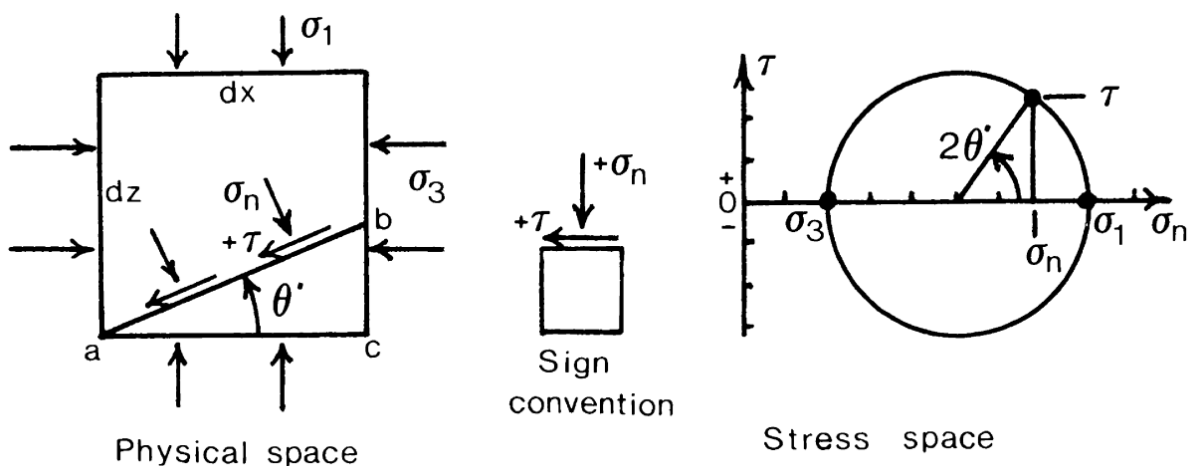
c – spójność (kohezja, siła na jednostkę powierzchni),

σ_n - normalne ciśnienie działające na wewnętrzną powierzchnię ścinania,

$\operatorname{tg} \phi$ - to współczynnik tarcia wewnętrznego.

Parametr ϕ nazywany jest *kątem tarcia wewnętrznego*. Czasami jest to wartość bezpośrednio widoczna, jak na przykład kąt nasypu luźnego materiału ziarnistego [37].

Podejście zaproponowane przez Mohra zakłada możliwość obliczania naprężeń na różnych płaszczyznach w materiale znajdującym się w równowadze (przyspieszenie wszystkich punktów jest równe zero) zapewniając również możliwość wyznaczania wspomnianych wcześniej parametrów c i ϕ .



Rys. 2.1. Naprężenia w punkcie. Naprężenia główne oraz naprężenia normalne i styczne na nachylonej płaszczyźnie, a także graficzna postać kombinacji naprężeń normalnych i stycznych na płaszczyznach pod różnymi kątami [37]

Na rys. 2.1 naprężenia główne, σ_1 i σ_3 , są pokazane jako działające na wzajemnie prostopadłych płaszczyznach, ograniczających mały element materiału. Płaszczyzny główne to te, na których nie występuje naprężenie styczne. Θ' to kąt opisany przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, od płaszczyzny głównej. Na jego przeciwległym ramieniu kąta Θ' znajduje się inna płaszczyzna, ab, na której działają naprężenie normalne, σ_n , oraz naprężenie styczne, τ . Przyjmuje się, że naprężenia normalne są dodatnie, gdy są ściskające, a naprężenie styczne jest

dotąd, gdy działa przeciwnie do ruchu wskazówek zegara na element materiału (rys. 2.1). Jeśli materiał znajduje się w równowadze to siły działające na trójkątny element abc muszą być zrównoważone do zera. Zakładając jednostkową głębokość materiału prostopadłą do płaszczyzn pokazanych na rysunku, siły mogą być zsumowane w kierunkach prostopadłych i równoległych do płaszczyzny ab w następujący sposób:

$$\frac{\sigma_n dx}{\cos\theta'} - \sigma_3 dx \operatorname{tg}\theta' \sin\theta' - \sigma_1 dx \cos\theta' = 0 \quad 2.2$$

$$\frac{\tau dx}{\cos\theta'} + \sigma_3 dx \operatorname{tg}\theta' \cos\theta' - \sigma_1 dx \sin\theta' = 0 \quad 2.3$$

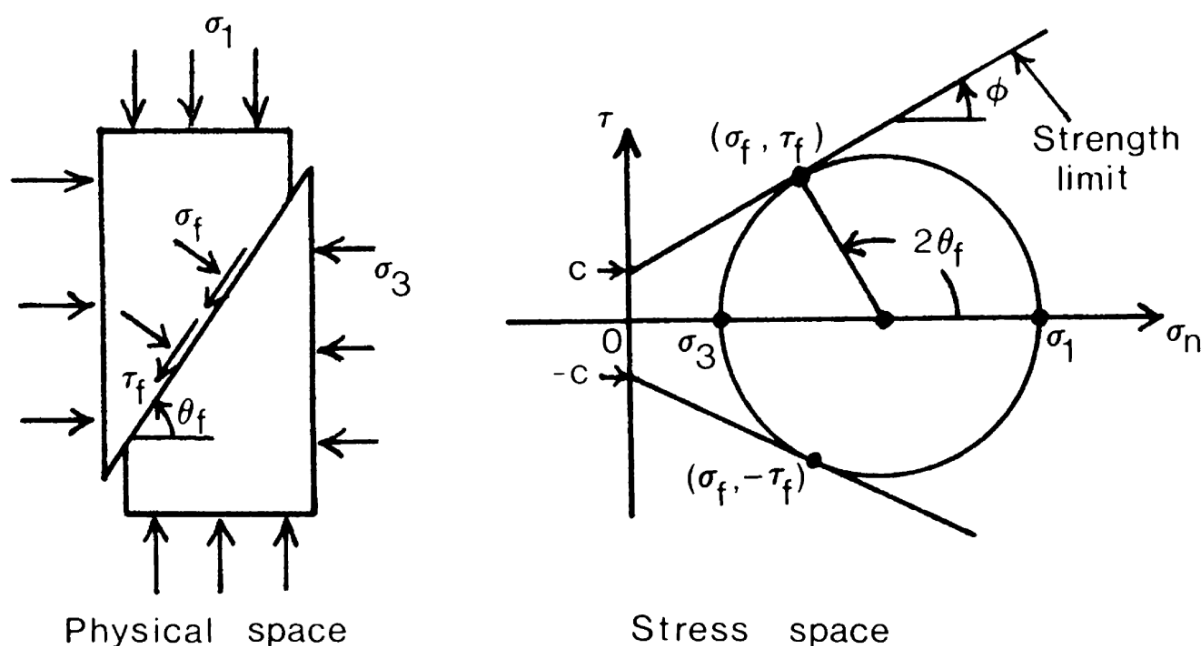
Po przekształceniu otrzymuje się następujące wzory na naprężenia normalne i styczne:

$$\sigma_n = \sigma_1 \cos^2\theta' + \sigma_3 \sin^2\theta' = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) \cos 2\theta' \quad 2.4$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin\theta' \cos\theta' = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) \sin 2\theta' \quad 2.5$$

Dzięki zastosowaniu tych dwóch równań (2.4 i 2.5) możliwe jest znalezienie kombinacji naprężeń, σ_n i τ , na płaszczyźnie pod dowolnym kątem θ' od płaszczyzny σ_1 . Równania 2.4 i 2.5 umożliwiają opisanie okręgu na wykresie τ względem σ_n , jeśli dla obu osi użyta jest ta sama skala, jak pokazano na rys. 2.1. Wszystkie punkty na tym okręgu reprezentują kombinacje naprężeń, σ_n i τ , na płaszczyznach w materiale, a każdy punkt reprezentujący kombinację naprężeń na wykresie można zlokalizować za pomocą promienia okręgu obróconego pod kątem $2\theta'$ przeciwnie do ruchu wskazówek zegara od punktu głównego σ_1 naprężenia na wykresie [37].

Istnieje jeszcze jedno powiązanie naprężeń w punkcie materiału, gdy dochodzi do zniszczenia lub jest ono nieuchronne. Jest nim kryterium wytrzymałości materiału. W materiale, który podlega prawu tarcia i spójności Coulomba, równanie 2.1 wyraża tę zależność na płaszczyźnie zniszczenia przez ścinanie. Prawo to można analogicznie przedstawić na wykresie naprężeń stycznych w zależności od naprężeń normalnych jako linię. Oznaczono ją jako "strength limit tj. limit wytrzymałości lub granica wytrzymałości" na rys. 2.2 [37].



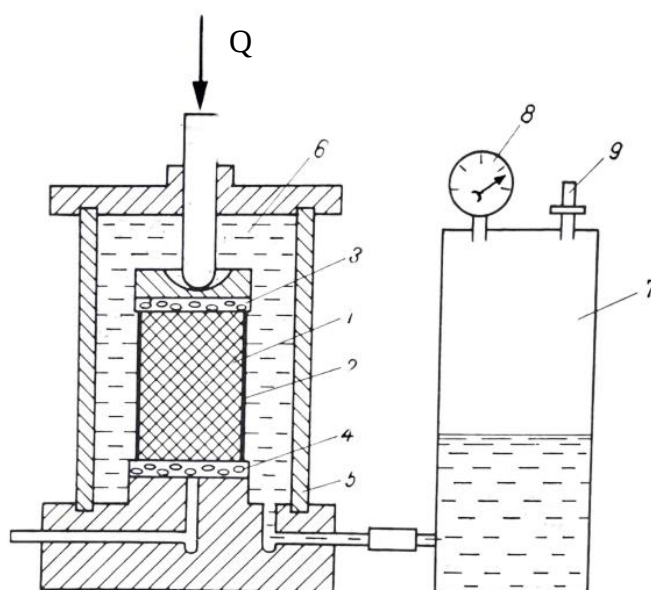
Rys. 2.2. Ścinanie gleby pod jednolitymi naprężeniami oraz wykres prawa granicy wytrzymałości, w połączeniu z kołem Mohr'a [37]

Granica wytrzymałości tworzy na wykresie dwie proste linie, które tworzą kąty $\pm \phi$ z osią σ_n i przecinają oś τ na poziomie $\pm c$. Możliwe jest, aby gleba spełniała zarówno prawa wytrzymałości Coulomba dotyczącego tarcia i spójności, jak i opisu równowagi Mohr'a jednocześnie. Wymagane jest jedynie, aby materiał znajdował się w warunkach zniszczenia na pewnej płaszczyźnie, bez poddawania go przyspieszeniom, co może mieć miejsce podczas procesu zniszczenia gleby przy stałej prędkości. Spełnienie tych wymagań umożliwia reprezentację wszystkich kombinacji naprężeń na płaszczyznach pod różnymi kątami w materiale na kole Mohr'a. Dwie płaszczyzny w szczególności są poddane kombinacji naprężeń ścinających i normalnych, które towarzyszą zniszczeniu przez ścinanie. Te dwie płaszczyzny zniszczenia są zlokalizowane na wykresie naprężeń (rys. 2.2) tam, gdzie koło Mohr'a styka się z liniami granicy wytrzymałości. Oznaczone są swoimi naprężeniami, σ_f i $\pm \tau_f$. Dla wszystkich innych punktów na kole Mohr'a naprężenia styczne działające na odpowiadające im płaszczyzny materiału jest mniejsze od wytrzymałości, i nie powinno dochodzić do zniszczenia przez poślizg. Na rys. 2.2 promień do każdego punktu odpowiadającego naprężeniom granicznym jest prostopadły do stycznej linii granicy wytrzymałości, a zatem kąt płaszczyzny pęknięcia względem płaszczyzny σ_1 można obliczyć jako:

$$\theta_f = \pm \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) [rad] \quad 2.6$$

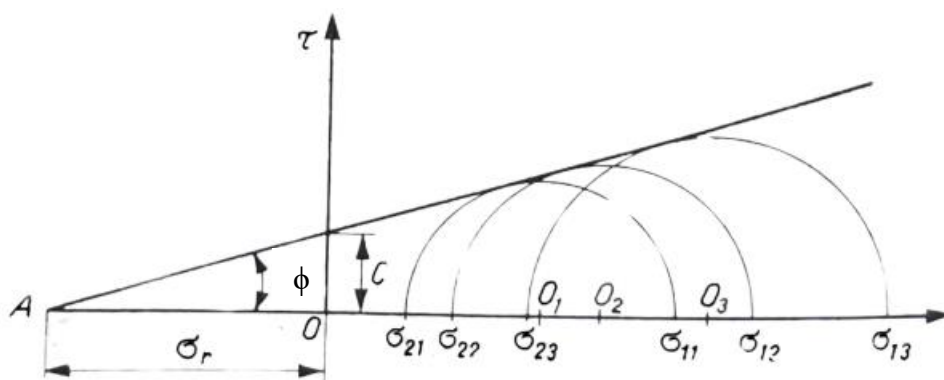
Należy zauważyć, że równowaga może być utrzymana tylko wtedy, gdy koło Mohr'a styka się z każdą linią granicy wytrzymałości w jednym punkcie i nie jest przecinane przez każdą linię w dwóch miejscach. W przeciwnym razie naprężenia styczne przekraczałyby wytrzymałość w niektórych kierunkach w materiale, co prowadziłoby do przyspieszeń [37].

Jak podaje literatura istnieje wiele metod wyznaczania spójności gleby c oraz kątów tarcia wewnętrznego ϕ . Najdokładniejsze wartości uzyskuje się przy użyciu „przrządu trójosiowego” (rys. 2.3). Próbkę gleby w kształcie cylindrycznym jest umieszczana w zamkniętym szczelnie, odkształcalnym, gumowym miechu. Próbkę gleby jest obciążana z góry ciężarem ściskającym Q , który wywołuje naprężenie główne σ_1 . Drugie naprężenie główne σ_2 wywołuje się ciśnieniem wody wypełniającej cylinder.



Rys. 2.3. Schemat przrządu trójosiowego do wyznaczania wartości c i ϕ , gdzie: 1 – próbka gleby, 2 – gumowy miech, 3 – filtr górny, 4 – filtr dolny, 5 – cylinder szklany, 6 – woda, 7 – sprężone powietrze, 8 – manometr, 9 – przewód do sprężarki [38]

Wyniki każdego pomiaru par naprężeń głównych nanosi się na oś odciętych i rysuje półkola wg metody koła Mohra (rys. 2.4). Styczna do tych półkoli wyznacza kąt tarcia ϕ oraz spójność c . Odcinek OA określa wytrzymałość gleby σ_r na rozciąganie [38].



Rys. 2.4. Wyznaczanie wartości c i ϕ przy użyciu metody koła Mohra – graficzna reprezentacja wyników par naprężeń σ_1 i σ_2 z przyrządu trójosiowego [38]

Przykładowe wartości kątów tarcia wewnętrznego oraz spójności różnych gleb zestawiono w tabeli 3.

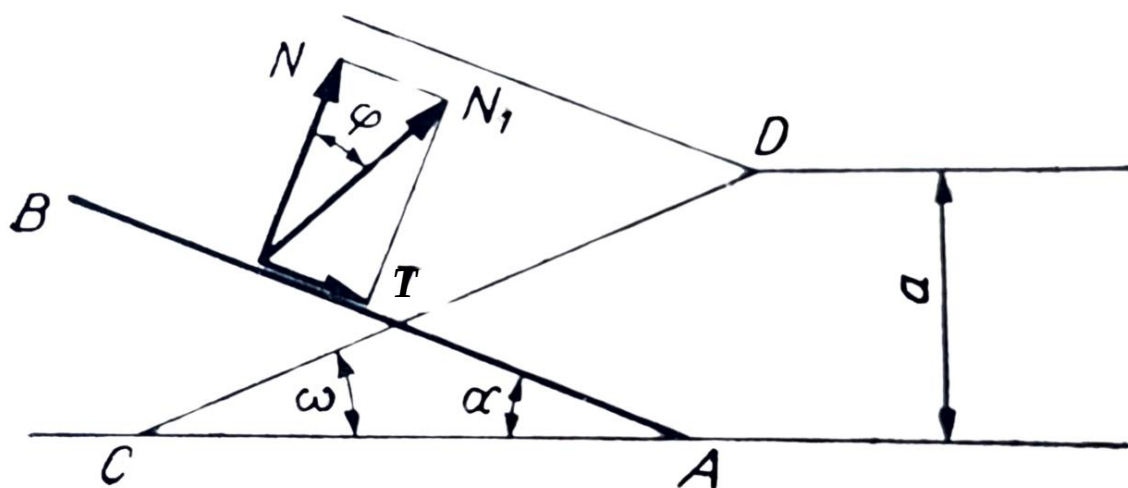
Tabela 3. Przykładowe wartości kątów tarcia wewnętrznego ϕ i spójności gleb c [38]

Rodzaj gleby	Stan gleby	Kąt tarcia wewnętrznego ϕ [°]	Spójność c [kPa]
Piasek średni	Zagęszczony	38 – 40	–
	luźny	32 – 35	–
Szczerek	Zagęszczony	25 – 30	–
	luźny	18 – 22	–
Piasek gliniasty	Zagęszczony	24 – 28	20 – 25
	Plastyczny	19 – 22	10 – 25
Gлина	Zagęszczony	22 – 26	25 – 30
	Plastyczny	15 – 19	15 – 20
Ił	Zagęszczony	17 – 19	40 – 60
	Plastyczny	10 – 14	25 – 30

Podsumowując spójność (kohezja) odnosi się do sił, które wiążą cząstki gleby razem, niezależnie od nacisku zewnętrznego. Jest to siła, która działa wewnątrz gleby, powodując, że jej cząstki trzymają się razem, co wpływa na wytrzymałość gleby na ścinanie. Spójność jest szczególnie istotna w glebach ilastych, gdzie cząstki mają tendencję do przyciągania się nawzajem.

Bernacki wskazuje również na istotność parametru kąta tarcia zewnętrznego φ , który jest zależny od rodzaju gleb oraz narzędzi skrawających glebę, które mają kształt klinów poruszających się w glebie pod określonymi kątami – większość elementów skrawających można traktować jako kliny płaskie. Klin płaski (rys. 2.5) tworzony przez płaszczyznę płytki, której dolna krawędź jest ustawiona prostopadłe do kierunku jazdy jest ostrzem skrawającym. Kąt ustawienia klina α względem podłoża jest nazywany kątem skrawania. Przesuwająca się po powierzchni klina warstwa skrawanej gleby wywołuje nacisk, który pochodzi od ciężaru gleby, od sił bezwładności przy jej unoszeniu i ewentualnie od jej sił sprężystości. Klin działa na skrawaną glebę siłą N_1 , której składowymi są: siła normalna N oraz styczna T , która jest siłą tarcia gleby o powierzchnię elementu skrawającego [38].

$$T = N \tan \varphi \text{ [N]} \quad 2.7$$



Rys. 2.5. Działanie klina płaskiego na glebę, gdzie: AB – klin, CD – płaszczyzna poślizgu pod kątem ω , a – grubość skrawanej warstwy gleby [38]

Naprężenie styczne τ do powierzchni AB i naprężenie σ_n prostopadłe do tej powierzchni są proporcjonalne do sił T i N .

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi \quad 2.8$$

Wartości kąta tarcia zewnętrznego φ , zależą od typu i wilgotności gleby oraz rodzaju powierzchni elementu skrawającego. Przykładowe wartości tych kątów w zależności od typu gleby zaprezentowano w tabeli 4.

Tabela 4. Kąty tarcia zewnętrznego φ gleb [38]

Rodzaj gleby	Stan powierzchni narzędzia	Kąt tarcia zewnętrznego φ [°]	
		Gleba sucha	Gleba wilgotna
Piasek	Niepolerowana	29	40
	Polerowana	21	38
Piasek gliniasty	Niepolerowana	26	38
	Polerowana	20	36
Glina	Niepolerowana	26	38
	Polerowana	20	36
Rędzina próchnicza	Niepolerowana	31	41
	Polerowana	22	38

Autorzy podkreślają wpływ wilgotności gleby na wartości kąta tarcia zewnętrznego. Dla gleb wilgotnych polerowanie powierzchni elementu skrawającego nie wpływa w znaczący sposób na zmianę kąta tarcia zewnętrznego dlatego jego opłacalność jest dyskusyjna. Pod wpływem działania klina w warstwie gleby powstają naprężenia ścinające. W płaszczyźnie, w której to naprężenie jest największe i przekracza wytrzymałość gleby na ścinanie następuje ścięcie warstwy gleby. Płaszczyznę tę nazywa się płaszczyzną poślizgu, a kąt ω pochylenia tej płaszczyzny nazywa się kątem poślizgu [38].

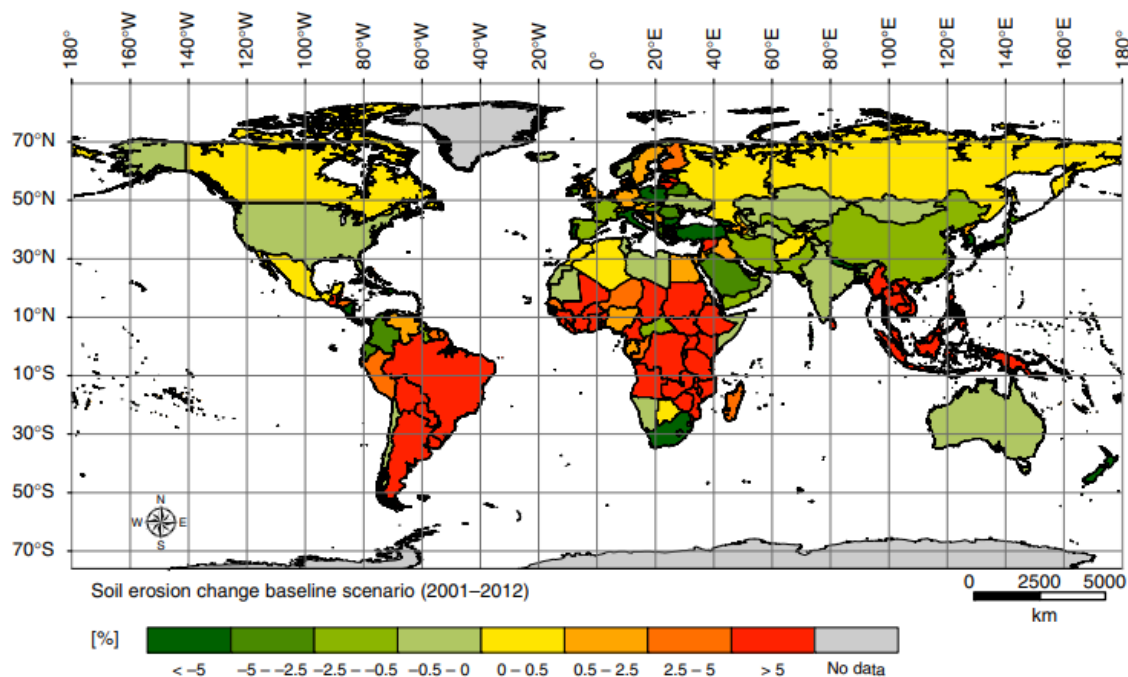
Kolejnym parametrem opisującym właściwości gleby jest zwięzłość, która odnosi się do stopnia zagęszczenia gleby, czyli określa jak mocno cząstki gleby są ze sobą upakowane. Zwięzłość wpływa na porowatość gleby, a tym samym na jej przepuszczalność i zdolność do retencji wody czyli na utrzymywanie wilgotności. Zwięzła gleba ma mniejszą ilość porów, co może prowadzić do problemów z przepuszczalnością wody, ale jednocześnie może być bardziej odporna na działanie sił zewnętrznych.

2.2.Erozja wodna gleb

Erozja gleby to proces naturalny polegający na stopniowym niszczeniu wierzchniej warstwy gleby przez czynniki zewnętrzne. Zjawisko to prowadzi do degradacji gleby, zmniejszenia jej urodzajności oraz zakłócenia równowagi ekosystemów. Erozja gleby może

mieć różne formy, w tym erozję wodną, wiatrową i lodową, a jej intensywność zależy od czynników takich jak nachylenie terenu, rodzaj gleby, pokrycie roślinne i praktyki rolnicze [39,40].

Prowadzone są badania, które na podstawie kombinacji teledetekcji, modelowania GIS oraz danych spisowych tworzą modele globalnej erozji (w ogólnym ujęciu). Przytoczone badania wskazują na potencjalny ogólny wzrost globalnej erozji gleby spowodowany rozszerzaniem się gruntów uprawnych. Wykazano, że najmniej rozwinięte gospodarki odnotowują najwyższe szacunkowe wskaźniki erozji gleby. Na rys. 2.6 i rys. 2.7 przytoczono wyniki wspomnianych badań, gdzie widoczne są zmiany średniej erozji gleby w poszczególnych krajach. Skala kolorystyczna reprezentuje procentowy wzrost lub spadek średnich wskaźników erozji gleby, uzyskanych poprzez porównanie wartości pikselowych (analizowano obszary z rozdzielczością, gdzie pojedyncze piksele miały wielkość 250x250m) w każdym z 202 krajów objętych obserwacją [41].

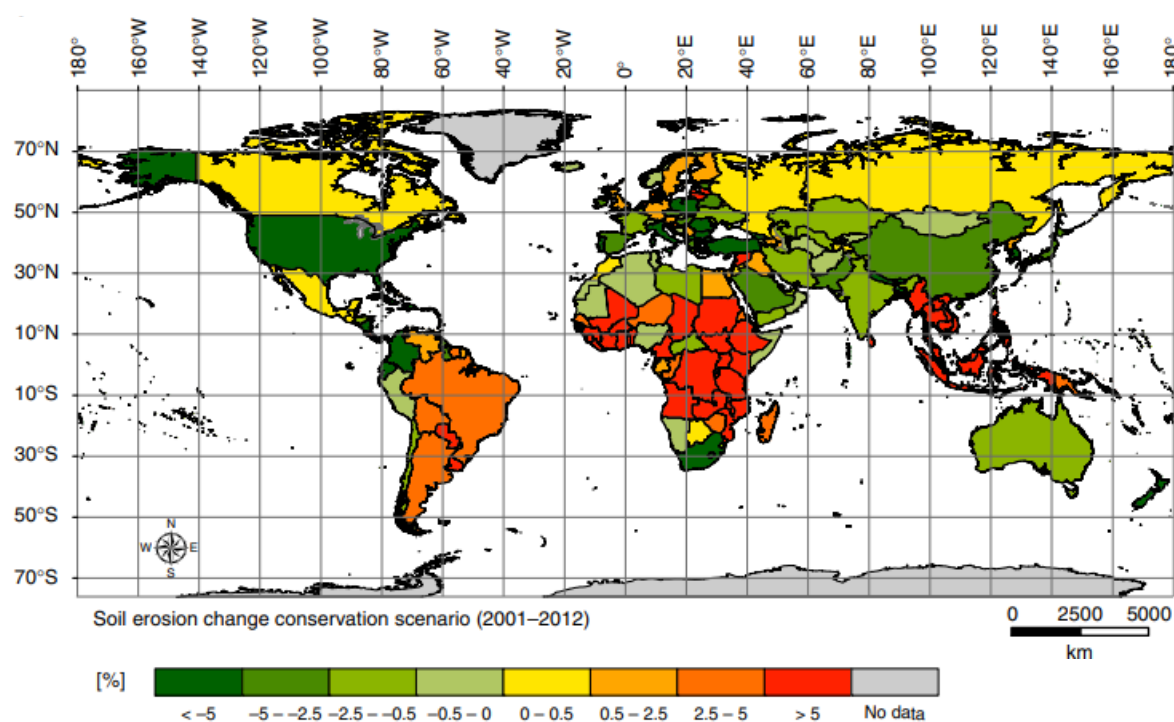


Rys. 2.6. Zmiana erozji gleby między 2001 a 2012 r zgodnie ze scenariuszem bazowym [41]

Zmiana erozji gleby między 2001 a 2012 rokiem zgodnie ze scenariuszem bazowym to różnica między tymi dwoma obserwowanymi okresami, która zależała wyłącznie od zmian w użytkowaniu ziemi i pokryciu terenu. Zostały one określone przez połączenie informacji satelitarnych dotyczących użytkowania ziemi z danymi z inwentaryzacji rolniczej. W tym

przypadku procentowa zmiana erozji wynika z połączonego efektu zmiany użytkowania ziemi/pokrycia terenu oraz łagodzącego wpływu praktyk ochrony gleby [41].

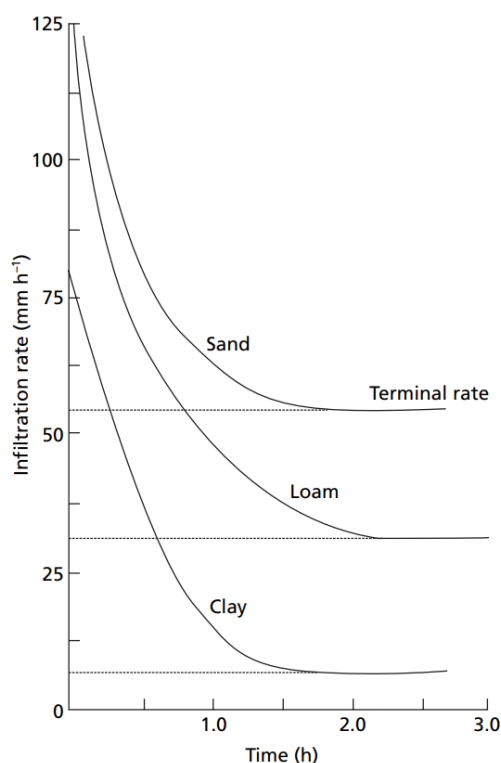
Przytoczone badania wskazują na ogólny wzrost procesów erozyjnych. Z uwagi na realizowaną tematykę pracy skupiono się jednak na scharakteryzowaniu jedynie procesu erozji wodnej. Jest to proces, w którym woda deszczowa lub powierzchniowa powoduje niszczenie warstwy gleby z powierzchni pola rolniczego. Jest to jedno z najpoważniejszych zagrożeń dla produktywności gruntów rolnych, ponieważ prowadzi do degradacji gleby, zmniejszenia jej urodzajności oraz pogorszenia struktury gleby. Problem jest złożony i zależy od wielu czynników. W rolnictwie jest związany głównie z nieprawidłową gospodarką wodną gleby na skutek błędów związanych z jej uprawą.



Rys. 2.7. Zmiana erozji gleby między 2001 a 2012 rokiem zgodnie ze scenariuszem ochronnym uwzględniającym praktyki mające ograniczać zjawisko [41]

Mechanizm występowania erozji wodnej szczegółowo opisano między innymi w przytoczonym źródle i czynnikiem wpływającym głównie na zachodzące procesy wymywania gleby zależą od szybkości, z jaką woda wnika w glebę. Parametr ten nazywany jest szybkością infiltracji i ma kluczowy wpływ na powstawanie spływu powierzchniowego. Woda jest wciągana do gleby przez siłę grawitacji oraz siły kapilarne, które przyciągają ją i utrzymują jako cienką warstwę molekularną wokół cząsteczek gleby. W czasie intensywnych

opadów deszczu, przestrzenie pomiędzy cząsteczkami gleby wypełniają się wodą, a siły kapilarne maleją, co powoduje, że szybkość infiltracji jest wysoka na początku opadów, a następnie spada do poziomu, który odpowiada maksymalnej utrzymywanej szybkości, z jaką woda może przechodzić przez glebę do niższych warstw (rys. 2.8). Ten poziom, zwany pojemnością infiltracyjną lub krańcową szybkością infiltracji, teoretycznie odpowiada nasyconej przewodności hydraulicznej gleby. W praktyce jednak pojemność infiltracyjna jest często niższa niż nasycona przewodność hydrauliczna. Oprócz roli, jaką odgrywają przestrzenie między cząstkami gleby (mikropory), duże szczeliny lub makropory wywierają istotny wpływ na infiltrację. Mogą one przenosić znaczne ilości wody, przez co gleby ilaste o dobrze zdefiniowanej strukturze mogą mieć wyższe szybkości infiltracji, niż wynikałoby to z samej ich tekstury. Zachowanie infiltracyjne w wielu glebach jest również dość złożone, ponieważ profile glebowe charakteryzują się obecnością dwóch lub więcej warstw o różnej przewodności hydraulicznej. Na przykład większość gleb rolniczych składa się z warstwy ornej, która jest naruszona oraz nienaruszonej warstwy podglebia [40].



Rys. 2.8. Typowe współczynniki infiltracji dla różnych gleb [40]

Czynniki topograficzne, takie jak nachylenie terenu i chropowatość powierzchni, odgrywają kluczową rolę w przestrzennym rozkładzie erozji gleby, podczas gdy opady deszczu i pokrycie roślinnością wchodzi w interakcje w różny sposób. W okresach niskich opadów

i ograniczonego pokrycia roślinnością, nachylenie terenu w połączeniu z opadami znacząco wpływa na erozję gleby. Z kolei w okresach obfitych opadów i gęstego pokrycia roślinnością, to właśnie współdziałanie roślinności i nachylenia terenu ma decydujący wpływ na erozję. Wpływ zmienności opadów na erozję gleby jest znaczny, ale z czasem maleje, podczas gdy znaczenie zmian w pokryciu roślinnością wzrasta. Badania wykazały, że wzorce rozkładu erozji gleby oraz czynniki napędzające te zmiany różnią się w zależności od miesiąca i regionu [42]. W odniesieniu do rolnictwa wpływ na zabużanie gospodarki wodnej scharakteryzowano w tabeli 5.

Tabela 5. Czynniki fizyczne i agrotechniczne wpływające na erozję wodną gleb

Czynnik	Charakterystyka	Źródła
Struktura gleby - stan zagregowania (przestrzennego powiązania) cząstek fazy stałej gleby	Gleby o strukturze gruzełkowej są mniej podatne na erozję wodną w porównaniu do gleb o strukturze zbitej lub rozpylonej. Gruzełkowata struktura sprzyja retencji wody i poprawia stabilność gleby, co zmniejsza ryzyko wymywania gleby przez wodę. W praktyce oznacza to, że pola uprawne z gruzełkową strukturą gleby są bardziej odporne na straty gleby i składników odżywczych spowodowane erozją.	[43,44]
Skorupa glebowa	Skorupa glebowa to cienka, twarda warstwa, która tworzy się na powierzchni gleby wskutek deszczu, wysychania lub mechanicznego zagęszczenia. Powstawanie skorupy glebowej ogranicza infiltrację wody, co zwiększa powierzchniowy spływ wody i nasila erozję wodną. Skorupa utrudnia wnikanie wody w glebę, co sprzyja jej spływowi po powierzchni i wymywaniu cząstek gleby, prowadząc do większych strat gleby i składników odżywczych.	[45–48]
Nadmierne zgęszczenie gleby na ścieżkach technologicznych ciągników	Koleiny powstające po przejazdach ciągników na polach rolniczych są istotnym czynnikiem wpływającym na erozję wodną gleby. Tworzenie się kolein prowadzi do zagęszczenia gleby, co zmniejsza jej przepuszczalność i zwiększa spływ powierzchniowy wody. W wyniku tego woda deszczowa koncentruje się w koleinach, co sprzyja jej szybkiemu przepływowi i intensyfikacji erozji wodnej, szczególnie wzdłuż linii kolein. Zjawisko to może prowadzić do powstawania głębokich żłobień i zwiększenia strat gleby na całym polu.	[49,50]

Zwięzłość gleby	Zwięzłość gleby, czyli stopień jej zagęszczenia i spójności, ma istotny wpływ na erozję wodną. Gleby o wysokiej zwięzłości są mniej przepuszczalne, co ogranicza infiltrację wody i sprzyja spływowi powierzchniowemu. Taki spływ prowadzi do zwiększenia ryzyka erozji wodnej, ponieważ woda nie może wnikać w glebę i zmywa wierzchnią warstwę gleby. Z drugiej strony, zwięzłe gleby są mniej podatne na rozmywanie przez wodę niż gleby luźne, ale gdy już dochodzi do erozji, skutki mogą być poważne z powodu zmniejszonej zdolności gleby do regeneracji.	[40]
Podeszwa płużna	Podeszwa płużna to zjawisko powstające na skutek wielokrotnego, mechanicznego ugniatania gleby na tej samej głębokości, najczęściej przez narzędzia rolnicze, takie jak pług. Jest to zagęszczona warstwa gleby, która tworzy się tuż pod warstwą orną i charakteryzuje się znacznie mniejszą przepuszczalnością wody. Obecność podeszwy płużnej prowadzi do ograniczenia infiltracji wody w głąb gleby, co z kolei zwiększa powierzchniowy spływ wody i nasila erozję wodną. Woda nie mogąc wnikać w glebę, spływa po powierzchni, co sprzyja wymywaniu wierzchniej, najbardziej urodzajnej warstwy gleby.	[51,52]
Siew rzędowy wzdłuż pochylenia terenu	Siew rzędowy, czyli technika uprawy roślin w równoległych rzędach, może wpływać na erozję wodną gleby w zależności od układu rzędów względem nachylenia terenu. Gdy rzędy są równoległe do nachylenia stoku, mogą prowadzić do koncentracji wody opadowej w rowkach, co zwiększa ryzyko spływu powierzchniowego i erozji wodnej. Natomiast siew rzędowy prostopadły do nachylenia stoku może działać ochronnie, spowalniając spływ wody i zmniejszając erozję.	[53–56]

2.3. Problematyka tematu w kontekście agrotechnicznym

2.3.1. Metody pielęgnacji upraw rzędowych

2.3.1.1. Metody mechaniczne

Metody mechaniczne opierają się na fizycznym manipulowaniu glebą i roślinami w celu ograniczenia wzrostu chwastów, poprawy struktury gleby lub ułatwienia dostępu powietrza do korzeni. Pielenie to płytkie spulchnianie gleby w międzyrzędziach połączone z niszczeniem

chwastów. Wykonuje się je do momentu, aż uprawy nie zaczną zacieniać międzyrzędzia [35,38,57].

Szkodliwość chwastów może mieć charakter bezpośredni lub pośredni. Pierwszy z nich polega na pobieraniu przez chwasty składników pokarmowych oraz wady, obniżanie temperatury gleby ograniczając dostęp światła, zajmowanie przestrzeni do swobodnego rozwoju roślin, a skończywszy na ich toksyczności dla roślin uprawnych, zwierząt i ludzi. Szkodliwość pośrednia jest bardzo zróżnicowana i można do niej zaliczyć między innymi zabużanie terminowości siewu, osłabianie wschodów oraz utrudnienie zbiorów upraw. Do tych czynników zalicza się również zapychanie drenów odprowadzających nadmiar wody – zjawisko głównie zauważalne w przypadku rozrostu głęboko korzeniących się chwastów. Badania prowadzone przez wielu autorów wykazują, że zdolność pobierania składników pokarmowych przez chwasty znacznie przewyższa zapotrzebowanie upraw rolnych. Straty spowodowane zachwaszczeniem mogą wynosić w zależności od przypadku 20-70% [58–63]. Autorzy wskazują również na problematykę walki z zachwaszczeniem wynikające ze stosowania metod uprawy uproszczonej często prowadzących do zmniejszenia jakości i wielkości plonów [64,65]. Jednak jak wykazuje część źródeł możliwe jest uzyskanie co najmniej takich samych plonów w uprawach uproszczonych, co konwencjonalnych - stosując zabiegi odchwaszczające możliwe jest wręcz uzyskanie wyższych plonów, w przypadku pszenicy 15-18%, soi 23%, buraka cukrowego o 37% [66,67]. Na zachwaszczenie wpływają również stosowany płodozmian oraz poplony. Wykazano, że np. w przypadku upraw buraka cukrowego bardziej zróżnicowany płodozmian zwiększał intensywność zachwaszczenia, przy czym najczęstsze były chwasty zimowe. Zwiększony udział zbóż w strukturze upraw sprzyjał obecności chwastów letnich. Technologia uprawy i włączenie międzyplonów nie miały znaczącego wpływu na intensywność zachwaszczenia w stanowiskach buraka cukrowego ani na spektrum gatunków chwastów [68]. Mechaniczne pielenie wiąże się z ryzykiem dużego zachwaszczenia, jeśli zabiegi nie są stosowane prawidłowo i w odpowiednim czasie, niezależnie od tego, czy stosowane są nowoczesne systemy zwiększające precyzję pielenia. Mimo to metody mechanicznego zwalczania chwastów zyskują na popularności z uwagi na coraz częstsze zakazy stosowania herbicydów oraz uodparnianie się chwastów na herbicydy [69].

Do narzędzi zwiększających precyzję pielenia w uprawach rzędowych zalicza się gwiazdy pielące, które oprócz stosowania standardowych narzędzi tnących glebę wpływają na

redukcję chwastów w rzędach [69]. Gwiazdy pielące działają podobnie jak brona talerzowa – z tą różnicą, że składają się z wielu pojedynczych palców i wciskają się w glebę między uprawianymi roślinami. W ten sposób chwasty są wyrwane i usuwane.

Rozwiązaniem dedykowanym do usuwania chwastów z całej powierzchni pola w przypadku zbóż jest brona chwastownik składająca się z wielu pojedynczych zębów sprężynowych, często z możliwością nastawiania obciążeń generowanych przez narzędzia pielące co jak wykazują źródła zwiększało skuteczność pielienia z 45 % do 75 %. Przy właściwym użytkowaniu zęby nie uszkodzają dobrze zakorzenionych i mocno rozwiniętych roślin uprawnych, które po procesie usuwania chwastów pozostają w glebie. Chwasty są natomiast wyrwane i usuwane. Dodatkowym pozytywnym efektem jest stymulacja bujnego wzrostu upraw zbożowych. Podczas korzystania z brony chwastownika gleba powinna być luźna, a warunki pogodowe słoneczne i bez opadów. W przypadku występowania powierzchniowego zaskorupienia gleby stosowanie bron zębowych do usuwania chwastów jest bezzasadne. Wadą metody jest zwiększenie ryzyka szkód w plonach związanego z przymrozkami dlatego ważnym jest dostosowanie terminu zabiegu do warunków zewnętrznych, w tym, warunków pogodowych. Metodę tę trudno stosować również w rzędach, zwłaszcza w przypadku silnie wyrosniętych chwastów [70–72].

Do metod mechanicznej walki z chwastami zalicza się również orkę, która powoli zaczyna być wypierana przez metody uproszczone. Jednym z celów orki przedzimowej jest usuwanie części chwastów poprzez głębokie przyoranie nasion zdolnych do kiełkowania w danym roku oraz wydobywanie na wierzch rozłogów perzu oraz innych chwastów aby przez zimę przemarzły. Wydobywane są w ten sposób na powierzchnię oczywiście pozostałe gatunki nasion chwastów, które nie straciły zdolności kiełkowania – stąd istotny jest termin jej wykonania. Wykazano, że wcześniejsze jej przeprowadzenie umożliwia wykiełkowanie chwastów, a następnie ich zniszczenie na skutek niskich temperatur oraz wiosennych zabiegów przygotowujących podłoże do siewu [58,73].

2.3.1.2. Metody chemiczne

Metody chemiczne to stosowanie herbicydów, fungicydów, i innych środków ochrony roślin w celu eliminacji lub kontroli patogenów, chwastów i szkodników. Charakteryzują się szybkim działaniem i skutecznością, jednak wymagają odpowiedzialnego stosowania ze względu na potencjalny wpływ na środowisko i zdrowie ludzi. Herbicydy to grupa substancji

chemicznych zaprojektowanych do zwalczania niepożądanych roślin, które można podzielić na następujące rodzaje [74,75]:

- selektywne – są to środki chemiczne, których zadaniem jest niszczenie określonych gatunków roślin pozostawiając uprawy właściwe nienaruszonymi. Przykładem są środki dedykowane do zwalczania roślin dwuliściennych w zbożach.
- Nieselektywne – środki niszczące większość roślin z jakimi mają bezpośredni kontakt. Przykładem herbicydów nieselektywnych jest glifosat, szeroko stosowany do zwalczania wszystkich typów chwastów w rolnictwie.
- Kontaktowe - działają tylko na część rośliny, z którą mają bezpośredni kontakt. Uszkadzają głównie liście i łodygi, a roślina może odrastać, jeśli korzenie pozostaną nietknięte.
- Systemowe - wchłaniane przez liście i korzenie rośliny, a następnie transportowane w jej wnętrzu wpływając na procesy życiowe rośliny, co prowadzi do jej całkowitego obumarcia.
- Przedwchodowe - stosowane przed wschodami chwastów, zazwyczaj tuż po siewie uprawy, aby zapobiec kiełkowaniu chwastów.
- Powschodowe - stosowane po wschodach chwastów, kiedy są już widoczne na polu. Można wyróżnić dwie podgrupy: selektywne lub nieselektywne, które scharakteryzowano powyżej.

Do głównych zalet chemicznego zwalczania chwastów można zliczyć przede wszystkim szybkość działania oraz wysoką wydajność (możliwość pokrycia dużych obszarów niewielkim nakładem pracy). Głównymi wadami tej metody jest rozwój odporności chwastów, zanieczyszczenia gleb oraz wód gruntowych, a także wpływ na zdrowie ludzi oraz zwierząt. Nieumiejętne dobranie dawki herbicydu może prowadzić do uszkodzenia właściwej uprawy lub narażenie roślin na zwiększony stres po oprysku. Ogólny mechanizm działania herbicydów opiera się na zakłóceniu kluczowych procesów fizjologicznych i biochemicznych w roślinach, co prowadzi do ich śmierci (*tabela 6*). Herbicydy mogą działać na różne sposoby w zależności od ich klasy i celu działania [74,75].

Tabela 6. Podstawowe mechanizmy działania herbicydów [74–78]

<i>Mechanizmy działania</i>	<i>Opis działania</i>	<i>Przykład herbicydu</i>
Inhibitory fotosyntezy	Blokują proces fotosyntezy, hamując funkcjonowanie fotosystemu II w chloroplastach. Roślina nie mogąc przekształcać energii słonecznej w energię chemiczną i obumiera.	Atrazyna
Inhibitory syntezy aminokwasów	Związki zakłócające produkcję kluczowych aminokwasów niezbędnych do wzrostu i rozwoju roślin np. hamują działanie enzymu EPSPS, który jest kluczowy w szlaku biosyntezy aminokwasów aromatycznych. Brak tych aminokwasów hamuje wzrost i prowadzi do śmierci rośliny.	Glifosad
Inhibitory podziału komórkowego	Zakłócają formowanie mikrotubuli podczas podziału komórkowego, co uniemożliwia komórkom roślinnym dzielenie się i prowadzi do zahamowania wzrostu korzeni i pędów.	Pendimetalina
Inhibitory syntezy lipidów	Blokują enzymy kluczowe dla syntezy lipidów, co uniemożliwia tworzenie błon komórkowych i prowadzi do śmierci rośliny.	Metolachlor
Inhibitory syntezy kwasów nukleinowych	Zakłócają syntezę kwasów nukleinowych, hamując działanie enzymu ALS (acetolaktazy syntazy), co prowadzi do zahamowania wzrostu roślin.	Sulfonylomoczniki
Regulatory wzrostu (hormonalne)	Naśladują działanie naturalnych auksyn (hormonów roślinnych), powodując nadmierny i niekontrolowany wzrost, co prowadzi do deformacji i ostatecznie śmierci rośliny.	2,4-D
Inhibitory syntezy białek	Blokują działanie enzymów odpowiedzialnych za syntezę białek, co prowadzi do zahamowania wzrostu i śmierci rośliny.	Glufosynat

Skuteczne stosowanie herbicydów wymaga odpowiedniego doboru substancji aktywnej do konkretnego gatunku chwastów, precyzyjnego dawkowania oraz zastosowania w odpowiednich warunkach pogodowych i fazach rozwoju rośliny. Jednym ze sposobów na zmniejszenie wpływu pestycydów na środowisko naturalne jest zrównoważone podejście, które łączy metody chemiczne z innymi technikami ograniczania zachwaszczenia, takimi jak mechaniczne, biologiczne i agrotechniczne, aby zmniejszyć negatywne skutki dla zdrowia.

2.3.1.3. Metody termiczne

Metody termiczne zwalczania chwastów polegają na skierowaniu energii w stronę niszczonej rośliny oraz poddanie jej działaniu przez określony czas, specyficzny, dla danego gatunku roślin tak, aby zaszły procesy niszczące wewnątrz nich. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury wyszczególniono i scharakteryzowano następujące metody termicznego zwalczania chwastów [79–92]:

- **Laserowe** – usuwanie chwastów odbywa się przy użyciu laserów wysokiej mocy, których wiązka nakierowywana jest przy użyciu algorytmów sztucznej inteligencji do lokalizowania i identyfikowania roślin chwastów, naprowadza lustra używane do kierowania wiązki laserowej na cel, aby zniszczyć go za pomocą ciepła. Pielenie laserowe ekspozuje tylko niewielką część pola do zabiegu. Metoda pozostawia tylko popioły po spalonych roślinach i nie narusza gleby. Jest to zatem ekologiczna metoda zwalczania chwastów. Usuwanie chwastów musi być powtarzane z uwagi na odrastanie wieloletnich gatunków chwastów z podziemnych części, które po zniszczeniu nadziemnych części pędów przez laser pozostają nienaruszone. Wyczerpanie zasobów w podziemnych częściach może być możliwe, jeśli laser będzie ciągle niszczył nowe pędy, ale może to wymagać wielu zabiegów laserowych.
- **Elektryczne (elektropielenie)** – elektryczne zwalczanie chwastów działa poprzez przenoszenie prądu elektrycznego przez roślinę docelową po kontakcie z elektrodą, powodując pęknięcie komórek roślinnych, co prowadzi do zabicia rośliny lub zahamowania jej wzrostu. Na proces wpływa wiele zmiennych takich jak moc elektryczna i prędkość aplikacji, morfologia chwastów oraz specyficzne warunki środowiskowe na danym terenie, może wpływać na użycie elektrycznego zwalczania chwastów i jego skuteczność. Źródła literaturowe wykazują na rosnącą popularność metody w kontekście poszukiwania alternatywnych metod odchwaszczania z uwagi na uodparnianie się chwastów na herbicydy.
- **Płomieniowe** – metoda polegająca na niszczeniu chwastów przy pomocy wysokiej temperatury (nie ognia). Ciepło zakłóca funkcjonowanie błon komórkowych, co powoduje śmierć chwastów lub ogranicza ich zdolność do konkurencji. Pielenie płomieniowe jest stosunkowo niedestrukcyjnym narzędziem, które jest zatwierdzone do stosowania w rolnictwie ekologicznym, nie wymaga stosowania herbicydów i nie narusza struktury gleby. Jest najskuteczniejsze, gdy jest stosowane w zintegrowanym

programie z innymi narzędziami zarządzania i rzadko jest wykorzystywane jako jedyna technika na polu. Jako fizyczna metoda kontroli, może pomóc w zarządzaniu populacjami chwastów odpornych na herbicydy w systemach konwencjonalnych.

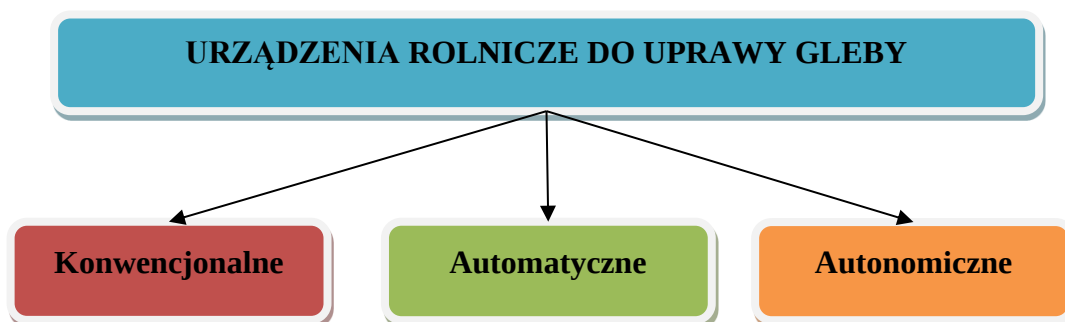
- **Parą wodną lub gorącą wodą** – metoda charakteryzująca się działaniem przeciwko szkodnikom i chorobom glebowym, uważana za obiecującą metodę zwalczania chwastów, pomimo braku selektywności między chwastami a uprawami. Stosowane głównie jako metoda przedwschodowa. Źródła literaturowe wskazują na możliwe skutki uboczne związane z wpływaniem na mikrobiom gleby poprzez działanie wysokiej temperatury. Jednak ci sami autorzy stwierdzili, że te efekty uboczne nie powinny dyskwalifikować tej techniki do zastosowania w rolnictwie ekologicznym, a jeśli rozważymy aplikację pasmową, te efekty uboczne powinny budzić mniejsze obawy. Para wodna może powodować wysoką śmiertelność nasion chwastów, w tym uśpionych co może sprzyjać skutecznej, długoterminowej kontroli chwastów.
- **Mikrofalami** – podatność roślin i nasion na uszkodzenia w wyniku obróbki mikrofalowej jest efektem termicznym, wynikającym z ogrzewania gleby i przewodzenia ciepła do nasion. W zwalczaniu chwastów promieniowanie mikrofalowe nie jest zależne od wiatru, co wydłuża okresy stosowania w porównaniu z konwencjonalnymi metodami opryskiwania. Energię można również skoncentrować na pojedynczych roślinach), bez wpływu na sąsiednie rośliny. Energia mikrofalowa może także zabić korzenie i nasiona, które są zakopane na głębokość kilku centymetrów w glebie.
- **Solarizacja** – metoda wykorzystująca światło słoneczne do zwalczania chwastów poprzez umieszczanie nad odchwaszczaną powierzchnią nieprzezroczystych, szczelnych, pokryć. Plastik zatrzymuje ciepło i wilgoć, co zachęca do kiełkowania nasion i wzrostu roślin. Jednocześnie blokując dostęp do wody i podgrzewając glebę, proces ostatecznie zabija roślinność pod spodem.
- **Pianami** – gorąca piana stanowi rozwinięcie metody zwalczania chwastów za pomocą gorącej wody, wzbogaconej o biodegradowalne środki spieniające. Metoda została opatentowana po raz pierwszy w 1995 roku. Metoda cechująca się skutecznością dla większości gatunków chwastów przy ograniczonym ryzyku dla środowiska i zdrowia ludzkiego. Mechanizm działania piany polega na izolowaniu chwastów od powietrza, zwiększając transfer energii do roślin, co pozwala na zmniejszenie dawki gorącej wody

zwiększając efektywność. Dodanie do wody piany przynosi korzyści w postaci mniejszego zużycia wody, mniejszej podatności na zmiany pogodowe, wyższej dokładności i szybkości aplikacji, dłuższego czasu transferu ciepła oraz niższych kosztów. W przypadku zwalczania roślinności nadziemnej gorącą pianą, podobnie jak przy innych metodach termicznych, zapotrzebowanie na ciepło zależy od gatunku chwastów, ich faz wzrostu, stanu wodnego oraz obecności wilgoci na powierzchni liści dlatego dobór właściwej dawki jest kluczowy dla efektywności metody.

2.3.2. Podział nośników maszyn rolniczych do uprawy gleby

Przemysł maszyn rolniczych w Europie obejmuje około 450 różnych typów urządzeń [24]. Aby właściwie sklasyfikować tę szeroką gamę produktów, konieczna byłaby szczegółowa analiza rynku, która jest bardzo rozległym zagadnieniem. Analizowanie całej gamy urządzeń rolniczych nie jest warunkiem koniecznym do sklasyfikowania projektowanego mechatronicznego urządzenia, będącego przedmiotem doktoratu wdrożeniowego, do odpowiedniej kategorii urządzeń z dedykowanymi nośnikami.

Skupiono się na identyfikacji i podziale najważniejszych i zasadnych z punktu widzenia doktoratu, urządzeń rolniczych znajdujących zastosowanie do uprawy gleby, przypisując im stosowane do ich uciągu nośniki np. ciągniki, roboty rolnicze. Zaproponowany podział ma na celu przede wszystkim wyróżnienie konkretnych zadań agrotechnicznych oraz dopasowanie urządzenia do typu upraw, w których będzie stosowane. Projektowane urządzenie musi w jak największym stopniu odpowiadać oczekiwaniom przyszłych użytkowników, a jego uniwersalność względem choćby agregowania z innymi maszynami i nośnikami będzie znaczącym atutem (agregowanie uwzględniające nie tylko mechaniczne połączenie lecz również źródła energii potrzebne do działania urządzenia). Odpowiednia klasyfikacja pozwoli dostosować narzędzie do wymagań technologicznych rynku maszyn rolniczych – stosując rozwiązania dostosowane do obecnego stanu techniki. Dlatego też zasięg podziału został ograniczony do segmentu maszyn przeznaczonych do podstawowej uprawy gleby oraz jej poprawiania.



Rys. 2.9. Podział urządzeń rolniczych do uprawy gleby ze względu na sposób działania,
[źródło: opracowanie własne]

Wyróżniono trzy główne kategorie urządzeń rolniczych stosowanych do uprawy gleby (rys. 2.9):

- konwencjonalne – urządzenia agregowane z ciągnikiem, nieposiadające własnego napędu oraz układu sterowania narzędziami np. układu hydraulicznego. Do tej kategorii można zaliczyć pługi, głębosze, brony, kultywatory, wały, glebogryzarki itp. Urządzenia wyróżniają się znacznie niższą ceną (nawet kilkukrotnie) w porównaniu z dwiema pozostałymi kategoriami urządzeń, a korzystanie z nich nie wymaga posiadania nowoczesnych ciągników. Głównymi zadaniami stawianymi konwencjonalnym urządzeniom są: regulowanie stosunków wodno-powietrznych; wprowadzanie do gleby nawozów oraz przykrycie resztek poźniwnych i słomy; niszczenie agrofagów (chwastów, szkodników, patogenów); dostarczanie składników pokarmowych; przygotowanie łoża siewnego; wytworzenie trwałej struktury gruzełkowej gleby; wprowadzenie nawozów i doglebowych środków ochrony roślin; przygotowanie pola dla pracy maszyn z innych segmentów np. siewników, opryskiwaczy itp.; wydobywanie korzeni i rozłogów np. perzu i niszczenie kielkujących chwastów; zapobieganie występowaniu i przeciwdziałanie niepożądanym zjawiskom np. skorupy glebowej, podeszwy płużnej [93]. Opisywana kategoria urządzeń jest stosowana głównie w gospodarstwach konwencjonalnych (zwanych też: intensywnymi, uprzemysłowionymi, klasycznymi, zindustrializowanymi itp.).

Rolnictwo konwencjonalne jest sposobem gospodarowania ukierunkowanym na maksymalizację zysku, osiąganego dzięki dużej wydajności roślin i zwierząt. Wydajność tę uzyskuje się w wyspecjalizowanych gospodarstwach stosujących technologie produkcji

oparte na dużym zużyciu przemysłowych środków produkcji i bardzo małych nakładach robocizny [94].

- automatyczne – urządzenia agregowane z ciągnikiem, często posiadające własne źródła napędu hydraulicznego (zasilane z WOM ciągnika) oraz zawsze elementy wykonawcze np. siłowniki i silniki hydrauliczne, zarządzane przez program sterownika maszyny. Do tej kategorii można zaliczyć: w szczególności nowoczesne automatyczne pielniki z korekcją położenia narzędzi w międzyrzędziach roślin (rozdział 2.3.3), pługi obrotowe, brony aktywne itp. Urządzenia wyróżniają się umiarkowaną ceną (są jednak znacznie droższe od maszyn konwencjonalnych). Zadania stawiane przed urządzeniami automatycznymi są praktycznie takie same jak dla ich odpowiedników konwencjonalnych posiadają one jednak czujniki pozwalające na wykonywanie zabiegów np. zgodnie z ideą rolnictwa precyzyjnego. Kategoria urządzeń kojarzona głównie z systemem rolnictwa ekologicznego i zrównoważonego. ***Rolnictwo ekologiczne*** – *sposób gospodarowania, który aktywizując przyrodnicze mechanizmy produkcyjne poprzez stosowanie środków naturalnych nieprzetworzonych technologicznie, zapewnia trwałą żyzność gleby i zdrowotność zwierząt oraz wysoką jakość biologiczną produktów rolniczych [94].* Sterowniki urządzeń poprzez sygnały zbierane z czujników rozmieszczonych na konstrukcji analizują je oraz sterują odpowiednio elementami wyjściowymi dostosowując się do wytycznych: wprowadzonych przez rolnika, analiz glebowych, warunków glebowych, rodzaju roślin itd. Wykonywany zabieg agrotechniczny jest zatem dostosowywany do zadanych parametrów wejściowych.
- autonomiczne – urządzenia posiadające własne źródła napędu jazdy w postaci silników spalinowych lub elektrycznych. Często kojarzone z urządzeniami z grupy maszyn automatycznych agregowanych z autonomicznymi nośnikami narzędzi (rys. 2.10). Urządzeniami kształtującymi tę kategorię są nowoczesne roboty polowe wykonujące zabiegi agrotechniczne zgodnie z wytycznymi rolnictwa precyzyjnego oraz rolnictwa 4.0 (rozdział 2.2.3). Zarządzane przez sterowniki oraz komputery przeznaczone do analizy torów jazdy za pośrednictwem wizji maszynowej połączonej z satelitarnym sygnałem pozycjonującym. Zadania stawiane urządzeniom z tej kategorii z punktu widzenia rolniczego nie różnią się od urządzeń konwencjonalnych. Wykonywanie ich możliwe jest jednak bez operatora oraz z wyeliminowaniem ciągnika rolniczego - pozbycie się ciężkich maszyn ma korzystny wpływ na głębę niwelując zjawisko powstawania podeszwy płuźnej lub ogólnego zagęszczania gleby zaburzając wchłanianie wody. Autonomiczne pojazdy są

obecnie najszybciej rozwijającą się grupą maszyn rolniczych i są one przyszłością rolnictwa [10,24]. Kategoria autonomicznych urządzeń jest kojarzona z systemami rolnictwa ekologicznego oraz integrowanego.

Rolnictwo integrowane – sposób gospodarowania, który umożliwia realizację celów ekonomicznych i ekologicznych poprzez świadome wykorzystanie nowoczesnych technik wytwarzania, systematyczne usprawnianie zarządzania oraz wdrażanie różnych form postępu biologicznego w sposób sprzyjający realizacji tych celów [94].



Rys. 2.10. Autonomiczny robot polowy do siewu i pielęgnacji upraw szerokorzędowych [1]

Projektowane w ramach doktoratu wdrożeniowego mechatroniczne narzędzie pielęgnujące posiadające możliwość adaptowania się do rzeczywistych warunków panujących na polu w celu zmniejszania energochłonności procesu można zaliczyć do kategorii **maszyn automatycznych**. Urządzenie do prawidłowego działania będzie potrzebowało nośnika w postaci autonomicznej jednostki lub ciągnika rolniczego. Będzie spełniało wytyczne rolnictwa precyzyjnego.

2.3.3. Problematyka pielenia mechanicznego

Głównym i najważniejszym celem pielenia mechanicznego jest stwarzanie lepszych warunków dla rozwoju roślin uprawianych w szerokich międzyrzędziach. Na podstawie przeanalizowanej literatury [57] zredagowano główne wyzwania stawiane tym uprawom (pośrednio maszynom stosowanym do ich pielęgnacji):

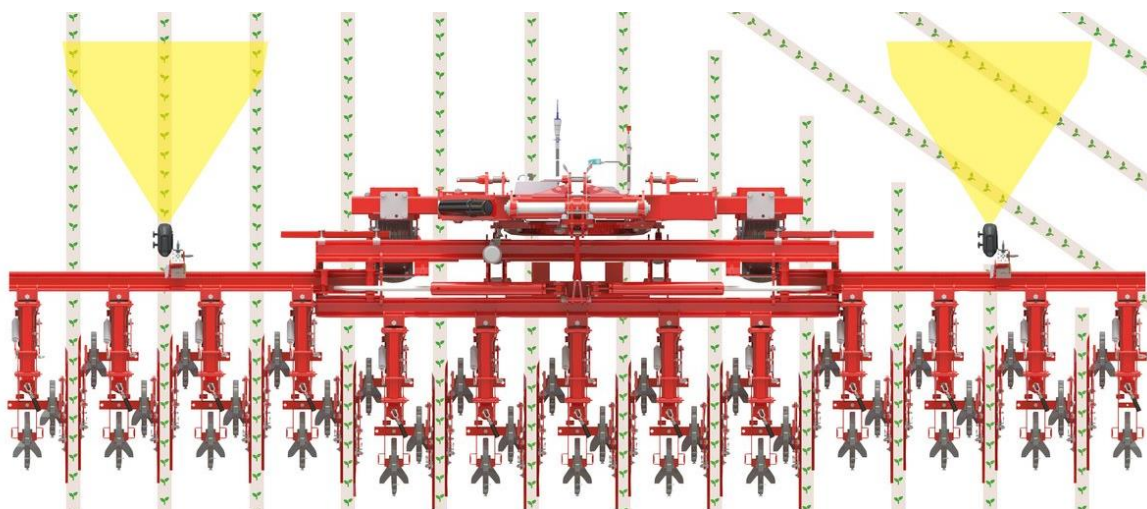
- niszczenie chwastów oraz kruszenie skorupy i spulchnianie przestrzeni między rzędami roślin w celu ułatwienia wsiąkania wody oraz napowietrzania roli, tym samym, przeciwdziałając parowaniu zmagazynowanej wody,
- utrzymywanie stałej głębokości pielenia w zakresie 2-6 cm,
- niekiedy przerzedzanie i pojedynkowanie roślin w rzędach – funkcja rzadko znajdująca zastosowanie z uwagi na znaczący rozwój precyzji siewu np. poprzez zastosowanie siewników punktowych,
- nieuszkadzanie właściwej uprawy w czasie pracy maszyny,
- duża wydajność i niewielki koszt procesu uwzględniając narzędzia,
- łatwa konserwacja i obsługa urządzenia uwzględniające ergonomię pracy użytkownika,
- korzystanie z lekkich ciągników zmniejszając ugniatanie gleby,
- narzędzia powinny być dobrane w sposób zapewniający podcinanie korzeni chwastów na całej uprawianej powierzchni pola, nie powodując jednocześnie zapychania się sekcji pielęgnujących chwastami,
- równomierne ścinanie i spulchnianie gleby przy jednoczesnym ograniczeniu wydobywania zlepieńców z głębszych warstw gleby,
- niezawodność maszyn rozumiana jako zabezpieczenie przed przeciążeniami konstrukcji np. uderzenia w kamienie, kolizje z korzeniami drzew itp.

Istotnym parametrem związanym z pieleniem jest prędkość wykonywania procesu, która dzięki rozwojowi nowoczesnych systemów sterowania została znacząco podniesiona. Przeprowadzona przez autora analiza rozwoju metod pielenia uwzględniająca prędkości i precyzję systemów wsparcia pielenia mechanicznego została szczegółowo opisana w publikacji [95].

Tabela 7. Efektywność zastosowania mechatronicznego systemu wspomagania pracy pielników międzyrzędowych w aspekcie parametrów: $\bar{v}$ - średnia prędkość zabiegu; s - odchylenie standardowe c_v - współczynnik zmienności.

	$\bar{v}$ (km · h ⁻¹)	s (km · h ⁻¹)	c_v (%)	Ref.
Pielenie konwencjonalne	6,46	3,61	55,93	[67,96–101]
Pielenie z automatycznymi systemami wsparcia	10,33	5,2	50,32	[67,98–105,105–114]
Wskaźnik poprawy	1,6	-	-	-

Z analizy literatury naukowej przedstawionej w *tabela 7* wynika, że wykorzystanie systemów mechatronicznych do dostosowywania pozycji narzędzi pielących pozwala osiągnąć średnią prędkość pielienia na poziomie 10,33 km/h. Dla metod tradycyjnych prędkość ta wynosi 6,46 km/h. Dane te oparto na analizie 28 przypadków dla pielienia z automatyczną korektą i 14 przypadków dla metody konwencjonalnej. Standardowe odchylenie dla tych pomiarów wynosi odpowiednio 5,2 km/h i 3,61 km/h. Współczynnik zmienności dla prędkości pielienia z korektą mechatroniczną osiągnął wartość 50,32. W przypadku pielienia konwencjonalnego współczynnik ten wynosi 55,93, co wskazuje na większą rozbieżność w uzyskanych wynikach.



Rys. 2.11. Przykładowa konfiguracja pielnika mechanicznego firmy Einboeck wyposażonego w system naprowadzania na rzędy roślin [115]

Szerokość robocza pielników mechanicznych determinowana jest przez liczbę obrabianych rzędów. Musi ona odpowiadać liczbie zastosowanych redlic w czasie siewu uwzględniając, że w miejscach łączenia przejazdów siewnika, sekcje zewnętrzne pielników mechanicznych

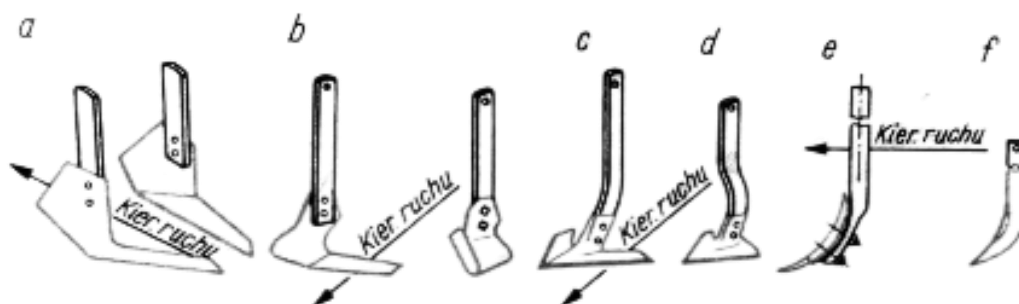
wyposażane są w sekcje ustawione na pół międzyrzędzia (rys. 2.11). Spełnienie tego warunku ma bezpośredni wpływ na efektywność oraz ograniczenie strat w czasie pielenia – ma to mniejsze znaczenie w przypadku stosowania nowoczesnych systemów pozycjonowania ciągników w czasie siewu, należy jednak mieć na uwadze, że systemy te również posiadają pewien błąd pozycjonowania. Niemniej zaleca się, aby liczba sekcji pielnika mechanicznego była dobrana w sposób nie powodujący łączenia sąsiednich przejazdów siewnika pełnymi sekcjami pielącymi [38,57,115].

Konfiguracja pielnika mechanicznego opiera się między innymi na dostosowaniu stref ochronnych upraw rzędowych, co bezpośrednio przekłada się na dokładność i efektywność pielenia ale również na wielkość strat spowodowanych naruszeniem wspomnianych stref przez narzędzia. W celu uzyskania jak najmniejszej strefy bezpieczeństwa wprowadza się pomiędzy łapy narzędzi dodatkowe osłony, najczęściej w postaci obrotowych tarczy. Ich zadaniem jest ochrona niewielkich roślin w pierwszych fazach rozwoju przed obsypywaniem przez glebę odprowadzaną przez narzędzia pielęgnujące co pozwala zmniejszyć strefę ochronną poniżej 50 mm z jednej strony względem środka rzędu roślin.

2.3.4. Podział i charakterystyka narzędzi do pielenia mechanicznego

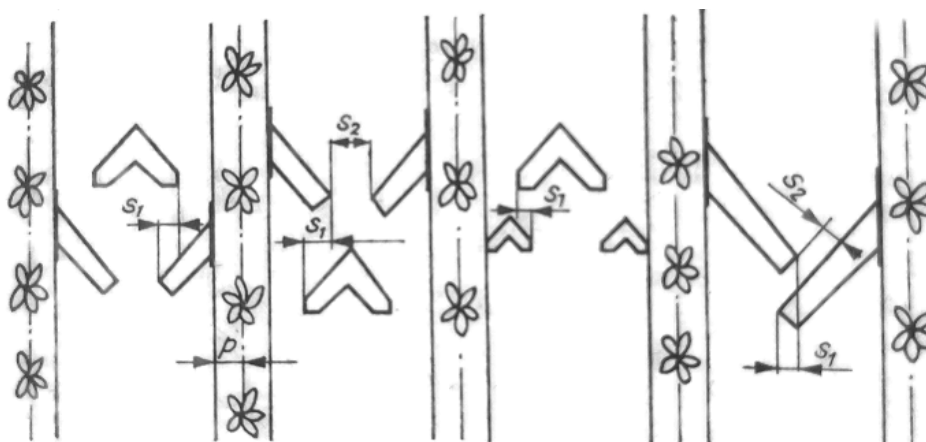
Podstawowym kryterium podziału narzędzi do pielenia mechanicznego jest sposób ich aktywacji tj. czy wymagają zewnętrznego źródła energii do działania (pomijając energię związaną z ruchem nośnika narzędzi, która jest konieczna w każdym przypadku). Wyróżnia się dwa typy:

1. **Bierne zespoły pielęgnujące** – zespoły składające się z elementów pielęgnujących oraz koła podporowego zamontowanych na dźwigni lub równoległoboku przegubowym. Konstrukcja umożliwia podmianę narzędzi pielęgnujących dostosowując je do specyficznych warunków glebowych panujących na danym polu. Najczęściej spotykanymi narzędziami roboczymi pielników są (rys. 2.12): noże kątowe (lewe i prawe), gęsiostopki, zęby spulchniające z wymiennymi elementami skrawającymi oraz dłuta.



Rys. 2.12. Części robocze pielników: a, b – noże kątowe (lewe i prawe), c, d – gęsiostopki, e – ząb spulchniający z wymiennym radłem, f – dłuto [57]

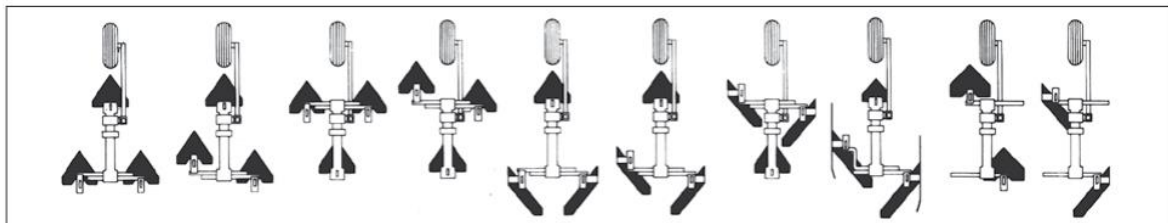
Ponadto konstrukcja zespołu pielącego musi mieć możliwość przezbierania do specyficznych konfiguracji narzędzi tnących, zależnych od szerokości międzyrzędzi oraz stopnia zachwaszczenia upraw. Narzędzia powinny być ustawiane w sposób, aby następowało pokrywanie się śladów po narzędziach na szerokości $s_1 = 3-4$ cm, natomiast odległość s_2 między ostrzami poszczególnych elementów nie była mniejsza niż głębokość robocza.



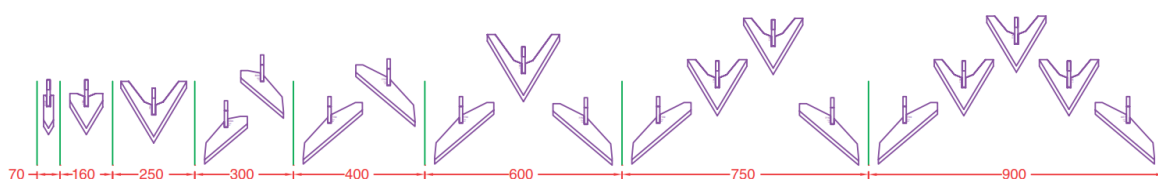
Rys. 2.13. Schemat rozmieszczenia elementów roboczych w zespołach pielących [38]

Parametr s_1 zapewnia gwarancję dokładnego podcięcia korzeni wszystkich chwastów. Nieprawidłowe ustawienie parametru s_2 wpływa na garnięcie ziemi i chwastów przez zespół pielący – należy zachować wzajemne wyprzedzenie narzędzi na odległości około 2-3 cm [35,38,57]. Analizując najnowsze źródła dotyczące pielników mechanicznych można stwierdzić, że zasada ich ustawiania pozostaje niezmienna, mimo zaobserwowania kolejnych, nowych, konfiguracji położenia narzędzi, których zadaniem jest lepsze

odprowadzanie chwastów i jak wspomniano wcześniej przeciwdziałanie zapychaniu się sekcji pielących.



Rys. 2.14. Konfiguracje ustawień elementów roboczych w sekcjach do pielienia mechanicznego [116]



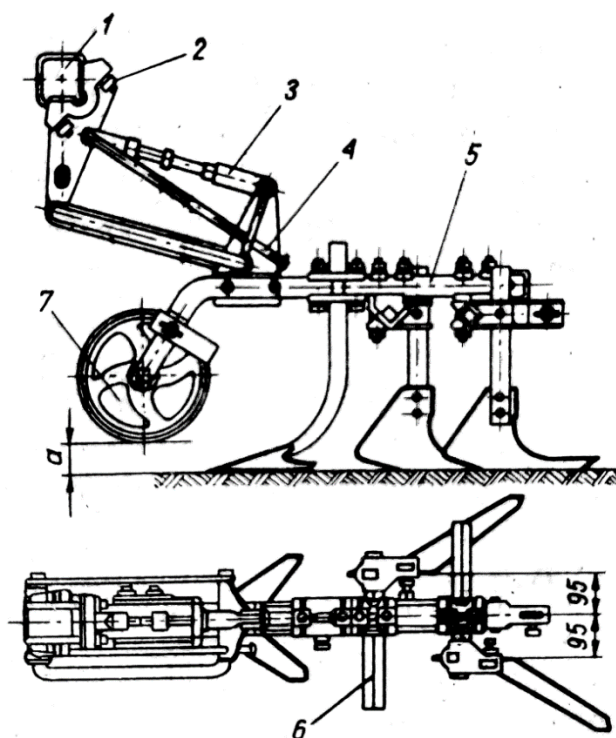
Rys. 2.15. Konfiguracje ustawień elementów roboczych w sekcjach do pielienia mechanicznego [117]

2. **Czynne zespoły pielące** tj. glebogryzarki – praca narzędzi pielących możliwa jest jedynie po zasileniu elementów czynnych z zewnętrznego źródła energii jakim jest najczęściej WOM ciągnika poprzez układ przekładni zębatych lub łańcuchowych lub wykorzystując układ hydrauliczny nośnika narzędzi. Głębokość pielienia nastawiana jest zazwyczaj za pośrednictwem płozy nastawialnej względem tarcz z nożami kątowymi. Jedną z głównych wad tego typu maszyn jest ograniczona możliwość przezbierania maszyny – jest ona dedykowana do określonego na etapie konfiguracji wersji maszyny typu uprawy np. buraków cukrowych. Czynne zespoły pielące znacznie lepiej spalniają międzyrzędzia i lepiej niszczą chwasty z uwagi na większą prędkość przecinania korzeni chwastów niż elementy bierne.

2.3.5. Geometria narzędzi stosowanych w pielnikach rzędowych w kontekście oporu ruchów skrawania gleby

Pielniki mechaniczne składają się z elementów konstrukcyjnych umożliwiających agregowanie z ciągnikami poprzez ramę główną maszyny oraz w zależności od wariantu wyposażenia w układ pośredniczący umożliwiając możliwość bocznego przesuwu względem

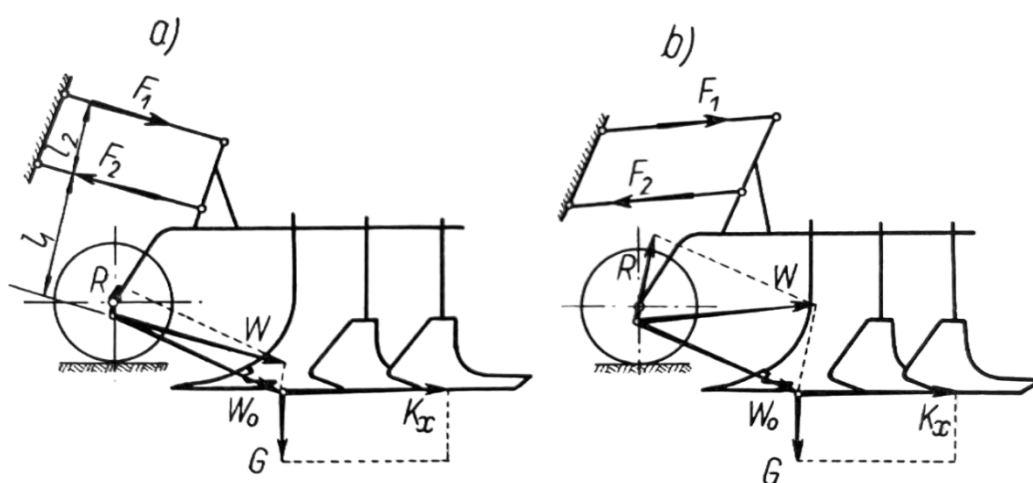
ciągnika oraz przenoszenia obciążeń z tym związanych. Uzyskuje się to przy użyciu prowadnic, równoległoboku lub zestawu rolek prowadzących. Uniwersalna rama główna maszyny zapewnia możliwość podwieszania na niej sekcji pielących (rys. 2.16), powielanych dla każdego międzyrzędzia. Belki narzędziowe ramion są dostosowywane do różnych konfiguracji maszyny i głównie zależą od maksymalnej założonej szerokości pracy maszyny. Ramiona narzędziowe służą do podwieszania wspomnianych zespołów roboczych przy zachowaniu możliwości przezbrajania w różne elementy skrawające glebę dostosowywane do danych warunków glebowych lub rodzaju upraw.



Rys. 2.16. Zespół/sekcja pieląca z równoległobokiem przegubowym, gdzie: 1 – belka narzędziowa ramy głównej maszyny; 2 – uchwyt montażowy; 3 – równoległobok przegubowy z nastawnym wahaczem górnym; 4 – pręt wydźwigowy; 5 – podłużne ramię zespołu; 6 – ramię poprzeczne; 7 – koło podporowe [35,38]

Jak podają źródła literaturowe jednym z możliwych sposobów montażu sekcji pielących jest również mechanizm dźwigni, jest on jednak praktycznie niespotykany we współczesnych rozwiązaniach. W rozdziale skupiono się na opisie zasady działania zespołów pielących wyposażonych w równoległoboki przegubowe. To samo dotyczy sposobu nastawiania głębokości pielienia – stosowanie płóz kopiujących teren, również nie znajduje obecnie zastosowania z uwagi na zmianę kątów wzniosu narzędzia oraz kąta skrawania. Najczęściej spotykanym mechanizmem nastawiania głębokości pielienia jest zmiana wysokości położenia

koła kopiującego teren przy pomocy śruby. Każda z sekcji przed rozpoczęciem pielenia musi zostać ustawiona wedle preferencji operatora w oparciu o czynniki wymienione w rozdziale 2.3.3. Zespół pielący posiadający równoległobok posiada zazwyczaj jedno ramię podłużne oraz dwa ramiona poprzeczne do montażu elementów roboczych. Z równowagi sił wynika, że opór gleby K_x , ciężar zespołu G i reakcja gleby R na koło podporowe muszą dawać wypadkową W równoległą do wahaczy równoległoboku (rys. 2.17). Wahacze projektowane są w sposób zakładający pracę z wahaczami równoległymi do podłoża lub przy nachyleniu pod kątem kilku stopni. Jeżeli wahacze uniesione są w górę (rys. 2.17, b), to przy tym samym oporze gleby reakcja R jest większa, niż w przypadku pracy z pochyleniem w dół [35,38].



Rys. 2.17. Siły działające na sekcję pielącą wyposażoną w równoległobok w dwóch konfiguracjach ustawienia: a – wahacze pochylone w dół, b – wahacze uniesione [35,38,118]

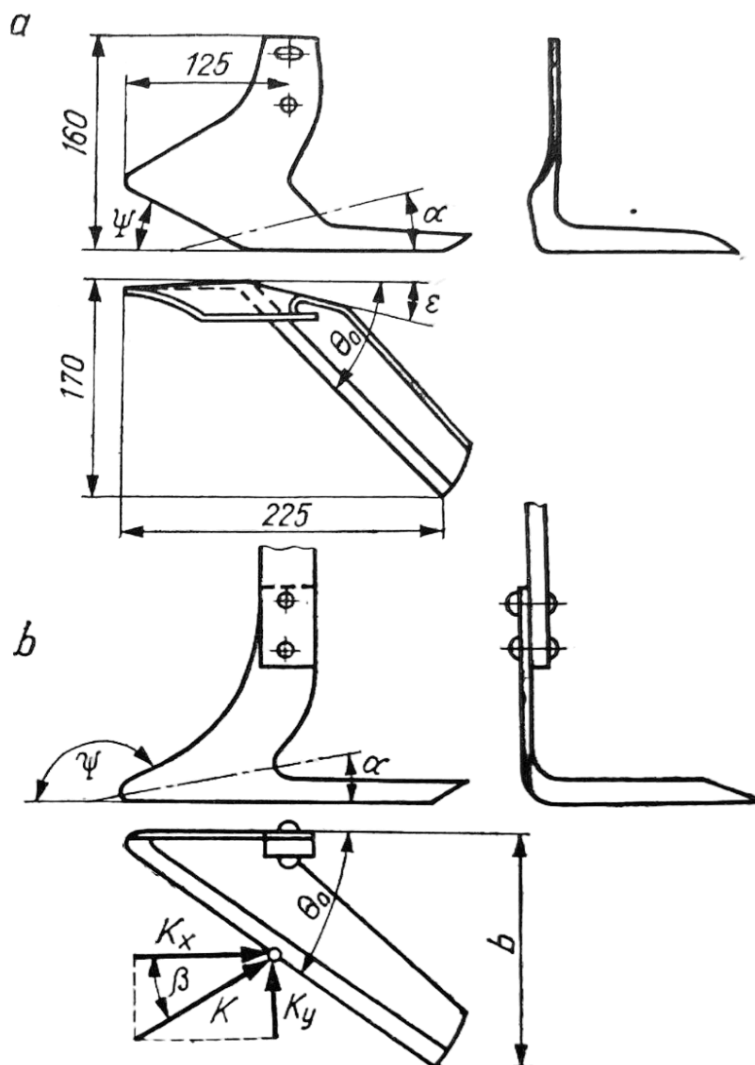
W przypadku zespołów pielących o niewielkiej masie lub gdy pielone gleby cechują się wysoką zwięzłością oraz występowaniem zjawiska skorupy glebowej część konstrukcji zapewnia możliwość dociążania równoległoboku sprężyną, zwiększając w ten sposób zdolność zagłębiania się łap w glebę. Górny wahacz jest ściskany, natomiast dolny rozciągany siłami:

$$F_1 = \frac{Wl_1}{l_2}, \quad 2.9$$

$$F_2 = \frac{W(l_1 + l_2)}{l_2}. \quad 2.10$$

Reakcja gleby na koło podporowe może być równa zero tylko w przypadku pracy z wahaczami nachylonymi w dół (rys. 2.17, a), jak podają autorzy przy założeniu, że opór gleby K oraz siła dodatkowa K_d są poziome. Siłę K_d oraz średni opór K_x , działające na pojedynczą łapę narzędzia

po zsumowaniu uwzględnia się w obliczeniach trzonka elementu roboczego liczonego na zginanie i ściskanie [35,38].



Rys. 2.18. Budowa noży kątowych w dwóch wariantach: a – z odchylonym nożem pionowym płaskim o kącie $\psi > 90^\circ$ [35,38]

Zasadniczymi i najczęściej spotykanymi narzędziami stosowanymi do pielenia mechanicznego są noże kątowe oraz gęsiostopy, których budowa zostanie szczegółowo przeanalizowana w niniejszym rozdziale. Noże kątowe (rys. 2.18) występują w dwóch wariantach lewym i prawym w zależności od położenia ostrza poziomego względem ostrza pionowego – są montowane na pionowym trzonku. Składają się z ostrza pionowego oraz poziomego. Wyróżniamy dwa typy noży, w których ostrze pionowe może być nachylone pod kątem ψ większym (rys. 2.18, b) lub mniejszym (rys. 2.18, a) od 90° . Kąt ψ osiąga najczęściej wartości z zakresów $25-30^\circ$ lub $155-160^\circ$ i decyduje o typie noża umożliwiając wprowadzenie

dotatkowego kąta wygięcia ε oznaczanego względem kierunku jazdy, który przyjmuje wartości z zakresu $0-15^\circ$ wpływając na sposób odprowadzania gleby – nie powodując przysypywania roślin zasadniczej uprawy spulchnioną glebą. Wadą wprowadzenia do narzędzia kąta ε jest odsuwanie gleby od rzędów roślin powodując odsłonięcie dolnych części łodyg, co nie zawsze jest wskazane. Noże kątowe cechują się niewielkimi kątami skrawania γ z zakresu $10-18^\circ$. Wykonuje się je z blach o grubości 3-4 mm, natomiast szerokość robocza noży nie przekracza zazwyczaj 220 mm z uwagi na konieczność zachowania sztywności, która wpływa na zachowywanie stabilnej i powtarzalnej głębokości pielenia na całej szerokości narzędzia [35,38,57].

Średni opór gleby K przykłada się w połowie długości noża poziomego pod kątem $\beta=30^\circ$. Wartość składowa K_x tego oporu dla gęsiostópek i noży kątowych oblicza się z oporu jednostkowego w następujący sposób:

$$K_x = k_p b [N], \text{ gdzie:} \quad 2.11$$

b – szerokość robocza narzędzia [m],

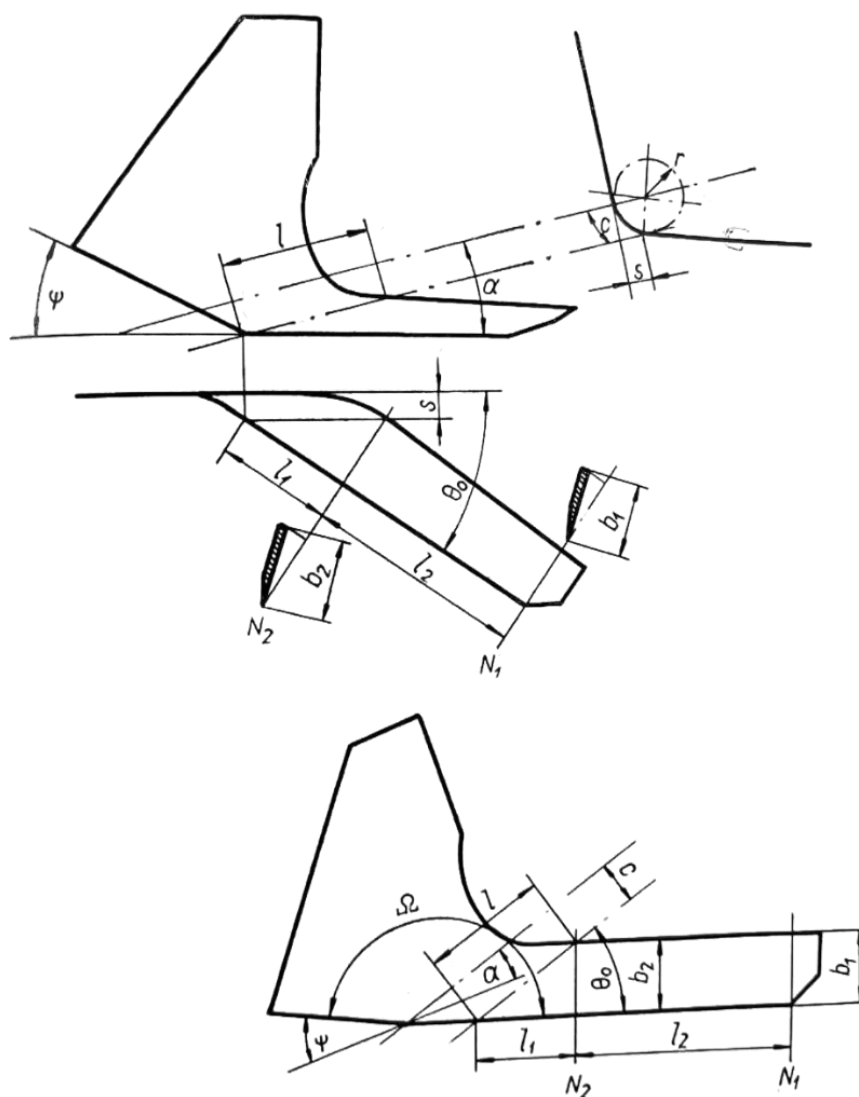
k_p – opór jednostkowy wynoszący jak podaje literatura dla głębokości roboczej $a < 5$ cm: 350-500 N/m dla gleb lekkich, 500-700 N/m dla gleb średnich oraz 700-1000 N/m dla gleb ciężkich.

Zaprezentowano rozwinięcie noża kąтового (rys. 2.19) dla przypadku płaskiego (pozbawionego ugięcia ε) o kącie $\psi < 90^\circ$. Jak podają autorzy promień zagięcia nie może w żadnym przypadku być mniejszy niż 20 mm w celu uniknięcia zaklejania się narzędzia glebą co zwiększa opory i pogarsza jakość pracy narzędzia. Linie konstrukcyjne N_0 oraz N_1 służą do wyznaczenia punktu zgięcia blachy, gdzie c jest odległością między tymi liniami a jej długość określa część łukowa noża co zaprezentowano na rys. 2.19. Kąt Ω między krawędziami ostrza pionowego i poziomego w rozwinięciu wynosi:

$$\Omega = 180^\circ + \theta_0 - \alpha - \psi. \quad 2.12$$

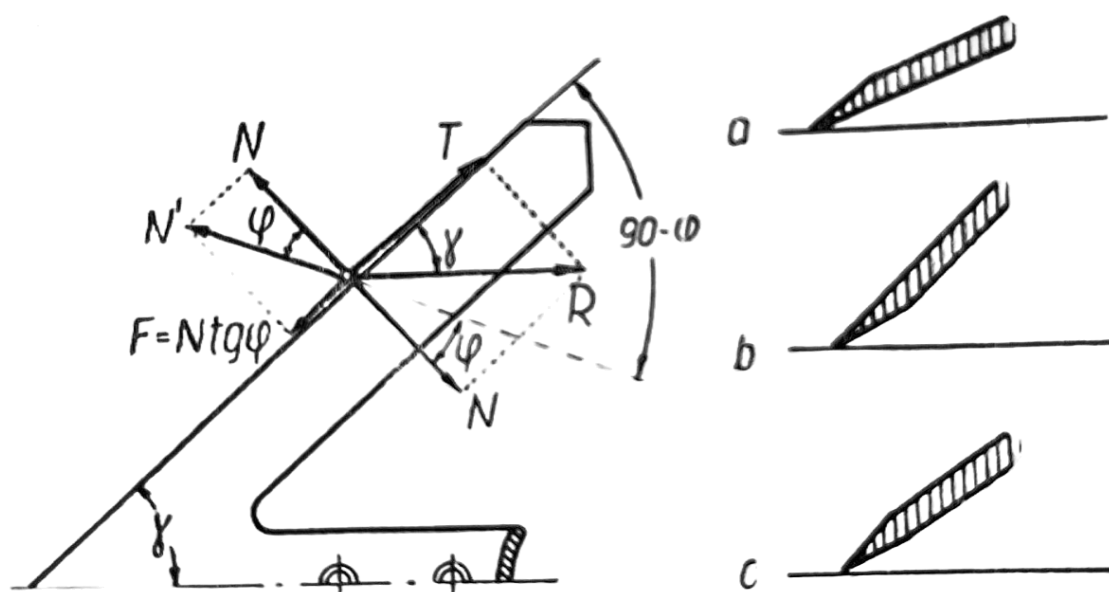
Wartość tego kąta ma wpływ na ułatwienie technologii wykonania narzędzia, które przy obecnym stanie techniki oraz powszechności stosowania maszyn CNC ma mniejsze znaczenie. Niemniej jednak aby krawędzie leżały na linii prostej, czyli aby $\Omega=180^\circ$, musi być spełniony warunek:

$$\theta_0 = \alpha + \psi. \quad 2.13$$



Rys. 2.19. Rozwinięcie noża kątownego z ostrzem pionowym płaskim o kącie $\psi < 90^\circ$: a – rzut pionowy i poziomy wygiętego noża, b – geometria rozwinięcia blachy noża [35,38]

Drugim typem narzędzi najpowszechniej stosowanych do pielenia mechanicznego są gęsiostopki. Występują one w wielu wariantach zależnych od zastosowania oraz warunków występujących na polu. Oprócz pielników mechanicznych, gęsiostopki, znajdują również zastosowanie w kultywatorach, gdzie pełnią głównie funkcję spulchniającą glebę ale ważnym jest również podcinanie chwastów występujących na powierzchni pola, przygotowując pole pod siew. Jak podają źródła przy dobieraniu gęsiostopki należy brać pod uwagę kąt rozwarcia skrzydeł narzędzia 2γ , który ma wpływ na warunki łatwego podcinania chwastów, który szczegółowo został zaprezentowany na rys. 2.20.



Rys. 2.20. Rozkład sił działających na ostrze gęsiostopki oraz sposoby ostrzenia go [118]

Podcinanie chwastów w czasie ruchu narzędzia w glebie polega na początkowym dociskaniu ostrza do chwastu powodując dociskanie rośliny do ziemi, która jest następnie zgniatana. Normalny nacisk ostrza na chwast N , odchyła się od pionu na skutek tarcia o kąt φ (N'). Opór R zgniatanej chwastami ziemi działa w kierunku przeciwnym do ruchu narzędzia. Składowa T oznaczona na rys. 2.20 jest siłą powodującą przesuwanie się łodyg lub korzeni chwastów wzdłuż ostrza wywołując tzw. cięcie ślizgowe. Dzięki temu zjawisku niechciane rośliny są łatwiej odprowadzane po podcięciu przez ostrze. Temu przesunięciu przeciwdziała jednak siła tarcia $F = Ntg\varphi$, której wielkość zależy od kąta tarcia φ . Warunek swobodnego ruchu chwastów wzdłuż ostrza zależy od tego czy kierunek działania siły oporu R będzie znajdował się wewnątrz kąta tarcia czy też na zewnątrz. Można więc wywnioskować, że jeśli $\gamma > (90^\circ - \varphi)$, to przesuwanie chwastów wzdłuż ostrza jest niemożliwe lub utrudnione. Natomiast jeżeli $\gamma < (90^\circ - \varphi)$, to siła R przechodzi na zewnątrz kąta tarcia umożliwiając cięcie ślizgowe. Znajac kąt tarcia można wyznaczyć odpowiedni kąt rozwarcia ostrza γ [118]. Jak podaje źródło kąt ten powinien wynosić:

$$2\gamma < 90^\circ.$$

Z zależności wynika, że im mniejszy kąt γ , tym występuje większe cięcie ślizgowe a tym samym lepiej podcinane są korzenie chwastów. Autorzy wskazują na ważną zależność wyznaczoną doświadczalnie, że dla gleb sypkich wykazujących dużą łatwość do ściśliwości

nawet przy kącie $\gamma = 35^\circ$ nie występowało przesuwanie łodyg wzdłuż ostrza. Natomiast praca narzędziami o tych kątach większych jak 35° na glebach zwięzłych z łatwością przecinały chwasty. Nadmierne zmniejszanie kąta γ powoduje wydłużanie skrzydeł gęsiostopki zmniejszając ich sztywność, zwiększając tym samym podatność na uszkodzenia narzędzia w czasie pracy. Praktycznie ten kąt powinien wynosić:

$$60^\circ \leq 2\gamma < 90^\circ.$$

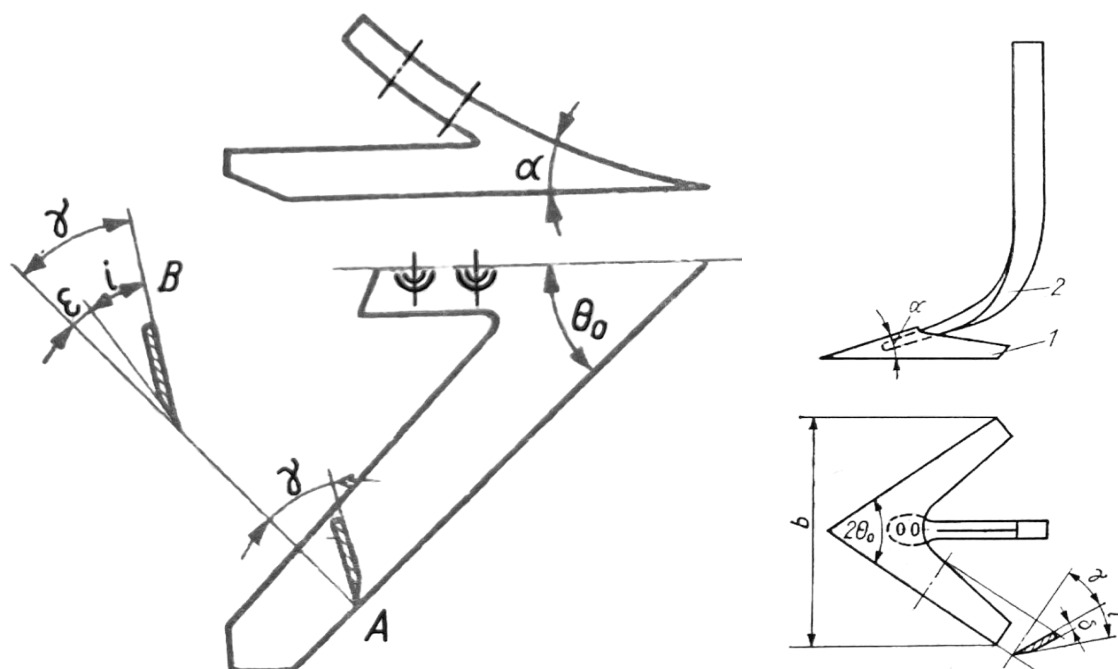
Wyszczególniono trzy warianty zaostrenia elementów skrawających gęsiostopki (rys. 2.20) i mogą one być zaostrene z zewnątrz (a), z wewnątrz (b) lub z obu stron (c). Zaleca się stosowanie zaostrenia z zewnątrz z uwagi na ograniczenie zalepiania się ostrza ziemią [118]. Ostrzenie narzędzia z wewnątrz korzystnie wpływa na lepsze przecinanie korzeni chwastów, natomiast elementy skrawające zaostrene z zewnątrz są trwalsze i wolniej się tępią. Ostrza powinny być również szlifowane. Kąt ostrza nie powinien być większy jak $\alpha = 10^\circ$, aby podcinanie korzeni chwastów było ułatwione [35,38].

Tabela 8. Parametry geometryczne gęsiostopek [35,38]

Szerokość b [mm]	Grubość blachy δ [mm]	Charakterystyczne kąty narzędzia wg oznaczeń z rys. 2.21		
		$2\theta_0$ [°]	α [°]	γ [°]
70 – 100	2,5	55 – 60	10 – 11	18 – 20
100 – 150	2,5 – 3	60 – 65	11 – 12	20 – 22
150 – 300	3 – 3,5	65 – 70	12 – 13	21 – 23

Tabela 8 zawiera zestawienie parametrów geometrycznych oraz technologicznych gęsiostopek. Do zalet ich stosowania można również zaliczyć bardziej intensywne spalanie międzyrzędzi w porównaniu do noży kątowych, co może mieć decydujące znaczenie w przypadku łączenia zabiegu pielenia mechanicznego np. z dodatkowym zadawaniem nawozów płynnych lub stałych w czasie wykonywania zabiegu. Charakterystycznymi dla gęsiostopek parametrami pracy są jej kąty oraz szerokość robocza b , która waha się w przedziale od 70 – 300 mm. Kąt rozwarcia skrzydeł gęsiostopy lub jak podają inne źródła kąt wierzchołkowy wynika z wcześniej zapisanego warunku i w praktyce osiąga on wartości z zakresu $2\theta_0 = 55\text{--}70^\circ$. Kąt wzniosu narzędzia osiąga natomiast wartości z zakresu $\alpha = 10\text{--}13^\circ$. Wyższe wartości tych kątów są przypisywane narzędziom o większych szerokościach

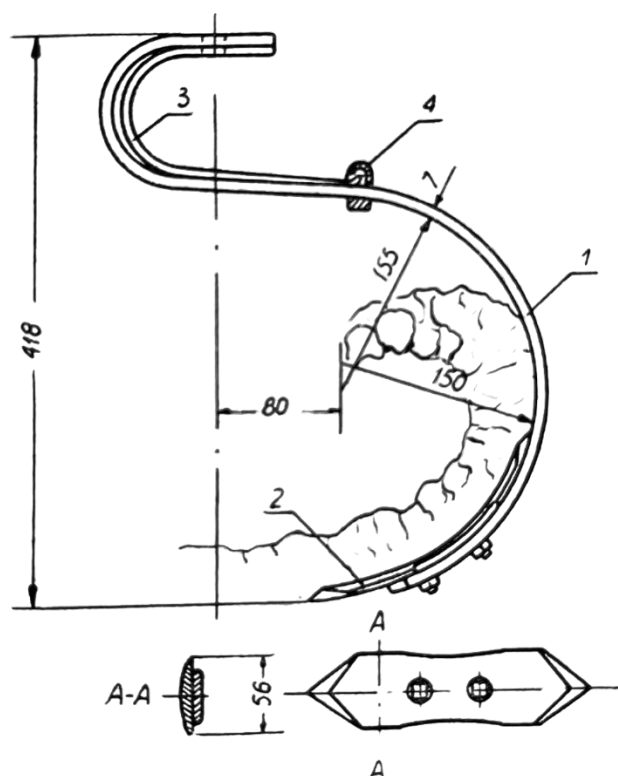
roboczych. Autorzy wskazują również na istotność dla pracy gęsiostopki kąta zaostrenia i , który stanowi różnicę pomiędzy kątem skrawania γ , a kątem przyłożenia ϵ (rys. 2.21) [35,38,57,118].



Rys. 2.21. Budowa geometryczna gęsiostopki, gdzie: 1 – element tnący, 2 – trzonek [35,38,57]

Gęsiostopy mocowane na zębach półsztywnych łatwiej wchodzi w zwięzłą glebę w porównaniu do zębów sprężynowych, dodatkowo nie wyciągają pasemek ziemi ani zlepieńców na wierzch, a więc mniej wysuszają rolę. Półsztywny układ umożliwia mniejsze drgania narzędzi przez co lepiej utrzymuje zadaną głębokość pielenia [118].

Kolejną grupą narzędzi stosowanych w czasie uprawy gleby (sporadycznie do pielenia) są dłuta montowane na sprężynowym uchwycie. Ich zastosowania są powszechniejsze dla kultywatorów, których przeznaczeniem jest uprawa gleby i jej intensywne mieszanie na stałej głębokości – ważne w czasie jednoczesnego z pieleniem aplikowania nawozów. Autorzy wskazują na konieczność zabezpieczania dłut przed uderzeniami w kamienie, co uzyskuje się poprzez odpowiednią budowę zębów lub poprzez sposób montażu do ramy głównej maszyny. Wadą zębów sprężynowych jest wspomniane mieszanie gleby, powodujące szkodliwe jej wysuszanie oraz wydobywanie nasion chwastów, dlatego znajdują głównie zastosowanie jako narzędzia uprawiające glebę. Zależnie od rodzaju stosowanych zębów rozróżnia się: kultywatory sprężynowe, półsztywne i sztywne tzw. Grubery [38,118].



Rys. 2.22. Ząb sprężynowy kultywatora [118]

2.3.6. Metody korekcji położenia narzędzi zwiększających wydajność

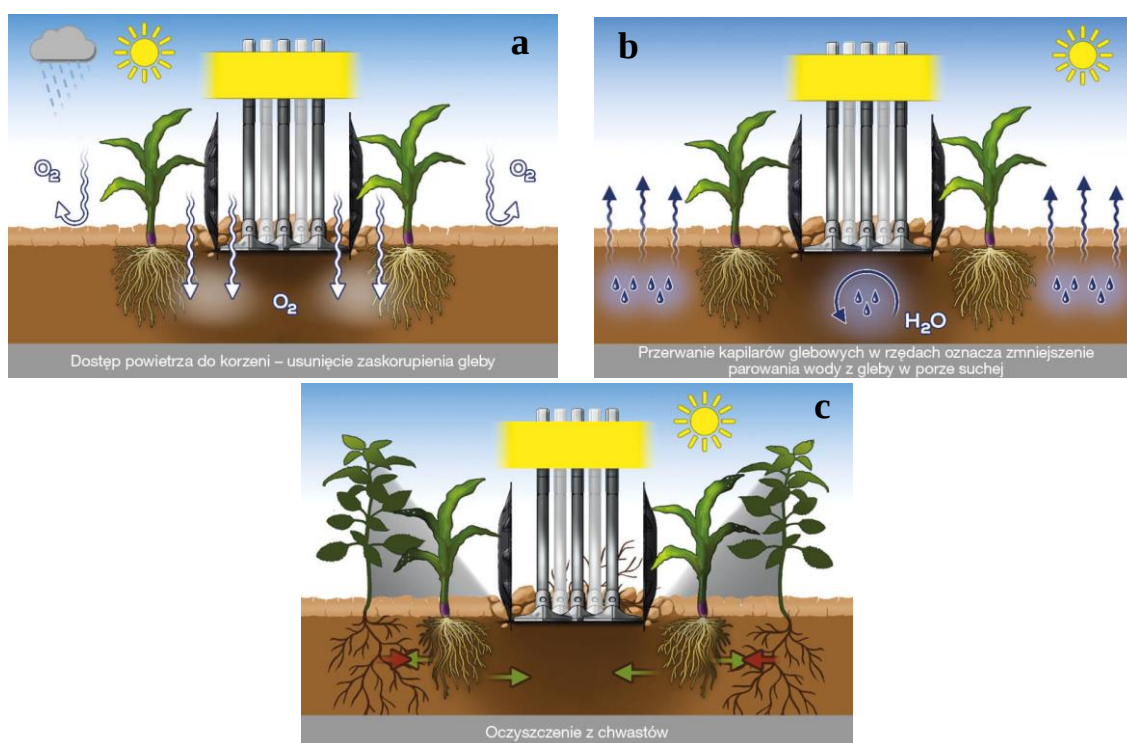
2.3.6.1. Wprowadzenie

Rozróżniono dwa główne typy naprowadzania narzędzi: korekcję poprzeczną w obszarze międzyrzędzi oraz korekcję poprzeczną w połączeniu z pieleniem przestrzeni między roślinami w rzędzie. Wyszczególniono tutaj dwa podtypy pielenia nożami z pneumatycznym napędem oraz pielniki rotorowe. Wszystkie opisane metody opierają się na wizyjnym sposobie określania położenia roślin względem narzędzi maszyn. Warto wspomnieć, że opisywane maszyny działają w oparciu o odmienne technologie - różnego rodzaju algorytmy wykrywania rzędów, odmienne sposoby wykrywania roślin w oparciu o filtrację kolorów RGB, stereometrię lub podczerwień a co za tym idzie korzystają z różnorodnych kamer i sprzętu elektronicznego. Wykorzystywane są również różne sposoby przeciwdziałania zakłóceniom związanym z wpływem światła słonecznego np. poprzez doświetlanie obszarów światłem LED.

Oczywistym i głównym celem automatycznej korekcji położenia narzędzi maszyny jest odciążenie operatora ciągnika oraz zwiększenie wydajności (szybkości) wykonywania

zabiegów. Warto jednak wspomnieć także o zaletach automatycznych systemów naprowadzania narzędzi wpływających pozytywnie na kondycję uprawianych roślin. Precyzyjne i dokładne pielnie wpływa korzystnie na następujące aspekty:

- wzruszenie gleby narzędziami pielącymi powoduje usunięcie zaskorupienia gleby i ułatwia dostęp powietrza do korzeni (rys. 2.23, a),
- zmniejszenie parowania gleby w czasie suszy poprzez przerwanie kapilarów glebowych w rzędach (rys. 2.23, b),
- oczyszczenie z chwastów uniemożliwiających dostęp światła do uprawianych roślin oraz pobierających wodę i składniki odżywcze z gleby (rys. 2.23, c) [10].



Rys. 2.23. Zalety pielienia mechanicznego, gdzie: a - dostęp powietrza do korzeni poprzez usunięcie zaskorupienia gleby, b - przerwanie kapilarów glebowych powodujące zmniejszenie parowania wody z gleby w porze suchej, c - oczyszczenie z chwastów [10]

2.3.6.2. Korekcja boczna w celu pielienia międzyrzędzi

Jest to najbardziej rozpowszechniona grupa automatycznych pielników. Na rynku rolniczym pojawiło się wiele różnych rozwiązań. Jednym z najbardziej powszechnych jest Culti Cam firmy Claas (rys. 2.24). System naprowadzania pielnika na międzyrzędzia roślin składa

się z: kamery, sterownika, panelu operatorskiego w postaci wyświetlacza w ciągniku, oświetlaczy LED oraz zaworów hydraulicznych do sterowania siłownikiem ruchu poprzecznego. Opracowany system naprowadzania narzędzi na międzyrzędzia jest uniwersalny w zastosowaniu, ponieważ wielu producentów korzysta z niego w swoich maszynach np. Einböck, Busa, Cavalleretti Group. Jak podaje producent Culti Cam znajduje idealne zastosowanie w uprawach ekologicznych oraz uprawach odpornych na herbicydy. Zwiększanie prędkości jazdy ciągnika może pozwolić na zwiększenie wydajności procesu przy zachowaniu wysokiej jakości pielenia poprzez możliwie jak najbliższe zbliżanie narzędzi do roślin w celu spulchnienia gleby oraz usunięcia chwastów. System dzięki automatycznej kompensacji błędów wynikających z kierowania ciągnikiem zmniejsza ryzyko uszkodzenia upraw oraz odciąża kierowcę. Wpływa zatem pozytywnie na ergonomię pracy.



Rys. 2.24. Pielnik z wizyjnym systemem Culti Cam naprowadzania narzędzi na międzyrzędzia roślin [10]

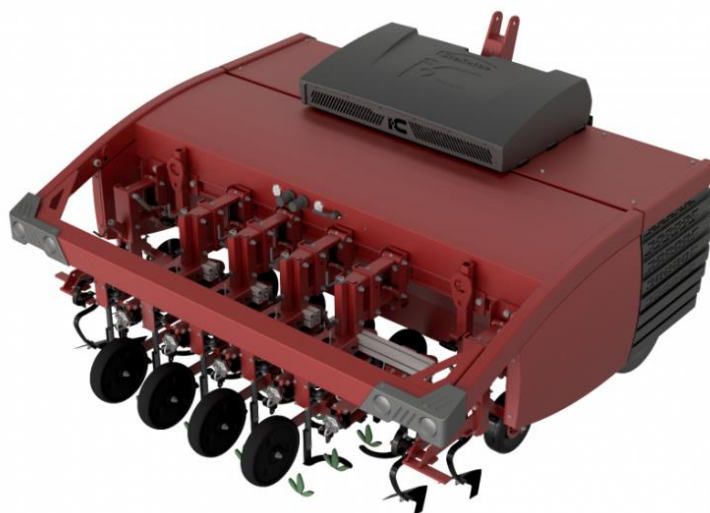
Opisywany system naprowadzania na rzędy wyróżnia się zastosowaniem stereometrii kamer. Wykrywanie rzędów roślin opiera się głównie na wykrywaniu skupisk interesującej użytkownika barwy roślin uprawnych i na tej podstawie wykonywanie korekty narzędzia. Takie rozwiązanie daje bardzo zadowalające wyniki w warunkach niskiego zachwaszczenia pola. Według producenta skorzystanie z pomiaru odległości między roślinami, a kamerą pozwala pracować również w warunkach dużego zachwaszczenia pod warunkiem, że rośliny posadzone w rzędach mają znacznie większą wysokość od chwastów. Wybieranie interesującej barwy możliwe jest z panelu operatora [10].

2.3.6.3. Korekcja boczna z pieleniem w rzędach

Ten typ automatycznych pielników znajduje głównie zastosowanie w uprawach warzyw, gdzie pielenie obszarów międzyrzędzi i przestrzeni między roślinami ma równie duże znaczenie. Na rynku maszyn rolniczych wraz z nowoczesnymi pojazdami autonomicznymi pojawia się szereg automatycznych i coraz bardziej skomplikowanych urządzeń. Poniżej przytoczono przykłady najciekawszych maszyn.

a). Pielenie nożykami z pneumatycznym napędem

Wyszczególniona grupa automatycznych maszyn do pielenia przestrzeni między roślinami w rzędzie została scharakteryzowana na przykładzie rozwiązania IC-Weeder firmy Steketee (rys. 2.25). Jak podaje producent maszyna zapewnia możliwość dokładnego pozycjonowania narzędzi, które zależy głównie od prędkości jazdy ciągnika - maszyna pracuje przy prędkości maksymalnej $0,83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i jest przeznaczona głównie do pielenia upraw warzyw np. sałaty. System wizyjny wyposażony jest w 3 kamery do rozpoznawania pojedynczych roślin. W celu uniknięcia niekorzystnego wpływu światła słonecznego na kamery zostały one umieszczone pod pokrywą. Obszar poddawany analizie jest oświetlany lampami LED dzięki temu uzyskano powtarzalne warunki pracy. Rozpoznawanie rzędów roślin i naprowadzanie maszyny działa niezależnie od ciągnika najczęściej przy użyciu siłownika hydraulicznego z uwagi na znaczne siły poprzeczne narzędzi oraz łatwość zasilania maszyn z hydrauliki zewnętrznej ciągnika.



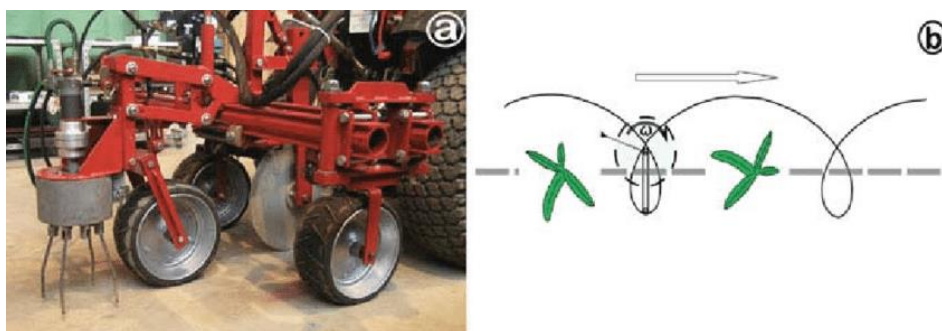
Rys. 2.25. Automatyczny pielnik IC-Weeder firmy Steketee do pielenia międzyrzędzi i przestrzeni między roślinami w rzędzie [10]

Opisywane rozwiązanie pozwala użytkownikowi na określenie interesującej go barwy rośliny w sterowniku maszyny, działa ono bowiem w oparciu o filtrację tła na podstawie koloru

uprawianych roślin. Możliwość parametryzacji pozwala uwzględnić zmiany barwy zieleni roślin spowodowane np. niedoborem azotu lub wody. Maszyna wykrywa jednocześnie kilka rzędów roślin w celu uniknięcia stanów nieustalonych dla maszyny spowodowanych nierównomiernością wschodów roślin w rzędach. Urządzenie wyposażone jest we własny kompresor do zasilania i poruszania aktywnymi narzędziami [10].

b). Rotorowe pielniki

Najbardziej skomplikowaną pod względem sterowania grupą maszyn pielących są rotorowe pielniki z wirnikiem skierowanym pionowo lub poziomo względem gleby. Skupiono się na pierwszym podtypie maszyn. Narzędzie pielące posiada od czterech do ośmiu zębów, które wprawia w ruch okrężny (rys. 2.26, a). Ruch narzędzia w połączeniu z ruchem prostoliniowym od ciągnika tworzy cykloidę (rys. 2.26, b). Urządzenie zostało opracowane przez Uniwersytet w Osnabrück w Niemczech we współpracy z Amazon Werke. Głównym celem było opracowanie pielnika do zwalczania chwastów w uprawach kukurydzy. Prędkość obrotowa narzędzia jest dostosowywana do prędkości jazdy, która osiąga maksymalną wartość $2,36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Układ sterowania urządzenia oparty jest na wizji maszynowej, ale korzysta również z czujników odległości w celu określenia dokładnego położenia roślin względem maszyny [10].



Rys. 2.26. Automatyczny pielnik rotorowy opracowany przez Uniwersytet w Osnabrück we współpracy z Amazon Werke [10]: a - konstrukcja pielnika rotorowego, b - cykloida nakreślana przez narzędzia pielące

Komercyjnym przykładem rotorowego pielnika jest robocrop inrow firmy Garford (rys. 2.27). Urządzenie o szerokości 6m może pracować z prędkością $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Jest on dedykowany do upraw warzywniczych, gdzie osiąga wydajność 4,2 ha/h. Na zakończeniach palców pielących znajdują się dyski, których profil został specjalnie zaprojektowany w celu zminimalizowania szkód w uprawach [10].



Rys. 2.27. Robocrop inrow firmy Garford - pielnik do pielęgnacji międzyrzędzi oraz przestrzeni między roślinami w rzędach [10]

2.3.7. Identyfikacja kluczowych parametrów pielenia

Przeprowadzony przegląd literatury dotyczącej pielenia mechanicznego pozwolił na identyfikację głównych parametrów procesu dotyczących pracy pielnikami mechanicznymi ale również wytycznych dla stosowanych elementów skrawających glebę – zaprezentowano je w formie tabeli 9.

Tabela 9. Kluczowe parametry wpływające na proces pielenia mechanicznego

Parametr	Charakterystyka
Głębokość pielenia	Kluczowa dla skutecznego usunięcia chwastów oraz nienaruszania uprawy właściwej. Zbyt płytkie pielenie może prowadzić do odrastania chwastów, podczas gdy zbyt głębokie może uszkodzić uprawy oraz prowadzić do niekorzystnego wysuszenia gleby.
Szerokość narzędzia	Parametr istotny z punktu widzenia pielenia upraw szeroko rzędowych oraz stosowanych konfiguracji ustawień narzędzi na sekcjach pielących. Zbyt duża szerokość narzędzia zmniejsza jego sztywność i zaburza równomierność głębokości pielenia oraz ma wpływ na warunek odprowadzania chwastów przez narzędzie (kąt 2θ).

Kąt skrawania α nazywany też kątem wzniosu narzędzia	Jest parametrem zależnym od wilgotności oraz typu gleby. Czynnikiem wpływającym na jego wartość jest również chropowatość ostrzy skrawających glebę. Wartość kąta α wpływa na łatwość zagłębiania się narzędzia w glebie oraz wielkość generowanych oporów.
Kąt tarcia zewnętrznego ϕ	Wartości kąta tarcia zewnętrznego ϕ , zależą od typu i wilgotności gleby oraz rodzaju powierzchni elementu skrawającego. Przykładowe wartości tych kątów w zależności od typu gleby zaprezentowano w tabeli 4. Kąt tarcia zewnętrznego na narzędziu skrawającym to kąt, pod którym siła tarcia działająca między powierzchnią roboczą narzędzia, a glebą i przeciwdziała ruchowi narzędzia. Jest zależny od α .
Kąt tarcia wewnętrznego ϕ gleby	Jest to miara oporu, jaki gleba stawia przeciwko przesuwaniu się jednej jej części względem innej, gdy działają na nią siły zewnętrzne. Innymi słowy, jest to kąt, przy którym gleba zaczyna się przemieszczać lub ślizgać.
Spójność gleby c	Jest to miara siły przyciągania między cząstkami gleby, która utrzymuje je razem. Jest to siła wewnętrzna wynikająca z chemicznych i fizycznych oddziaływań między cząstkami gleby. Wpływa na stabilność gleby oraz na to, jak łatwo gleba ulega rozkruszeniu lub skrawaniu.
Kąt rozwarcia narzędzia 2θ	Parametr mający wpływ na sposób odprowadzania chwastów po ścięciu ich korzeni w czasie pielenia. Im mniejszy kąt θ , tym występuje większe cięcie ślizgowe a tym samym lepiej podcinane są korzenie chwastów. Dla gleb sypkich wykazujących dużą łatwość do ściśliwości, nawet przy kącie $\theta = 35^\circ$ nie występuje przesuwanie łodyg wzdłuż ostrza. Natomiast praca narzędziami o tych kątach większych jak 35° na glebach zwięzłych z łatwością przecina chwasty. Nadmierne zmniejszanie kąta θ powoduje wydłużanie skrzydeł gęsiostopki zmniejszając ich sztywność.
Sposób oraz kąt zaostrenia ostrzy i	Ostrza powinny być szlifowane, a kąt ostrza nie powinien być większy jak $i = 10^\circ$, aby podcinanie korzeni chwastów było ułatwione. Zaleca się stosowanie zaostrenia z zewnątrz z uwagi na ograniczenie zalepiania się ostrza ziemią. Ostrzenie narzędzia z wewnątrz korzystnie wpływa na lepsze przecinanie korzeni chwastów, natomiast elementy skrawające zaostrome z zewnątrz są trwalsze i wolniej się tępią.
Konfigurowalność ustawień elementów skrawających na sekcji	Narzędzia powinny być ustawiane w sposób, aby następowało pokrywanie się śladów po narzędziach na szerokości $s_1 = 3\text{--}4$ cm, natomiast odległość s_2 między ostrzami poszczególnych

	elementów nie była mniejsza niż głębokość robocza. Parametr s_1 zapewnia gwarancję dokładnego podcięcia korzeni wszystkich chwastów. Nieprawidłowe ustawienie parametru s_2 wpływa na garnięcie ziemi i chwastów przez zespół pielący – należy zachować wzajemne wyprzedzenie narzędzi na odległości około 2-3 cm (rys. 2.13).
Prędkość pielienia	Nowoczesne systemy sterowania umożliwiają zwiększanie prędkości jazdy pielników do około 10 km/h. Prędkość jazdy wpływa na precyzję pielienia mechanicznego oraz na wielkość generowanych obciążeń niosąc również ryzyko negatywnego zagęszczania gleby poprzez generowanie większych sił związanych z dynamiką jazdy maszyny.
Nie mieszanie gleby	Kluczowe dla utrzymywania wilgotności gleby. Mieszanie gleby powoduje niekorzystne wysuszanie oraz wydobywanie nasion chwastów z jej głębszych warstw pobudzając ich kiełkowanie.
Zabezpieczenie przed przeciążeniem	Narzędzia skrawające glebę powinny być zabezpieczone przed uszkodzeniami wynikającymi z kolizji z elementami znajdującymi się wewnątrz gleby np. kamieniami, itp.
Regulowanie wilgotności gleby	Prawidłowo wykonywany zabieg pielienia przerywa kapilary wodne powodujące nadmierne parowanie wody z gleby oraz pozytywnie wpływa na infiltrację wody w czasie opadów.
Zapylenie	Dąży się do jak największego ograniczania erozji gleb. Nadmierne generowanie pyłu w czasie wykonywania zabiegów sprzyja erozji wietrznej gleb.

Wymienione w *tabela 9* czynniki są również wytycznymi, które były uwzględniane w czasie projektowania mechatronicznej sekcji pielącej, będącej przedmiotem doktoratu wdrożeniowego. Są one związane z geometrią narzędzi pielących oraz czynnikami typowo fizycznymi związanymi z mechaniką gruntów i jej właściwościami.

2.4. Metody wyznaczania obciążeń narzędzi

2.4.1. Metody teoretyczne

Metody teoretyczne wyznaczania obciążeń narzędzi rolniczych polegają na zrozumieniu mechaniki interakcji między narzędziami a glebą. Główna zasada polega na modelowaniu sił działających na narzędzia podczas ich pracy w polu na podstawie wyznaczonych zależności. W teorii, obciążenia te są analizowane na podstawie właściwości gleby, takich jak jej kąt tarcia wewnętrznego, spójność, wilgotność oraz struktura, a także na podstawie parametrów technicznych narzędzi, jak kształt ostrza, szerokość, głębokość pracy i prędkość poruszania się. Teoretyczne metody wyznaczania obciążeń narzędzi rolniczych wykorzystują różne podejścia, jednak każda z nich zakłada istnienie określonego modelu gleby i narzędzia, na podstawie którego można przeprowadzać obliczenia. Celem tych analiz jest głównie optymalizacja konstrukcji narzędzi, tak aby były jak najbardziej efektywne w różnych warunkach glebowych, zmniejszając jednocześnie zużycie energii i materiału. Wspomniane zagadnienia można rozpatrywać dwuwymiarowo lub trójwymiarowo. Poniżej zaprezentowano, wybrane na podstawie przeglądu literatury metody teoretyczne, które są stosowane do obliczania szacunkowych obciążeń narzędzi rolniczych.

Uniwersalne równanie Reece'a [37]

Reece zaproponował uniwersalne równanie, które opisuje siłę niezbędną do cięcia gruntu za pomocą narzędzia do prac ziemnych. Siły oporu wyznaczono w oparciu o metodę zaproponowaną przez Terzagiego. Zakłada ona, że ilościowy wpływ ciężaru gruntu, spójności oraz nacisku nadkładu powyżej poziomu fundamentu można rozdzielić i są one dodawane algebraicznie.

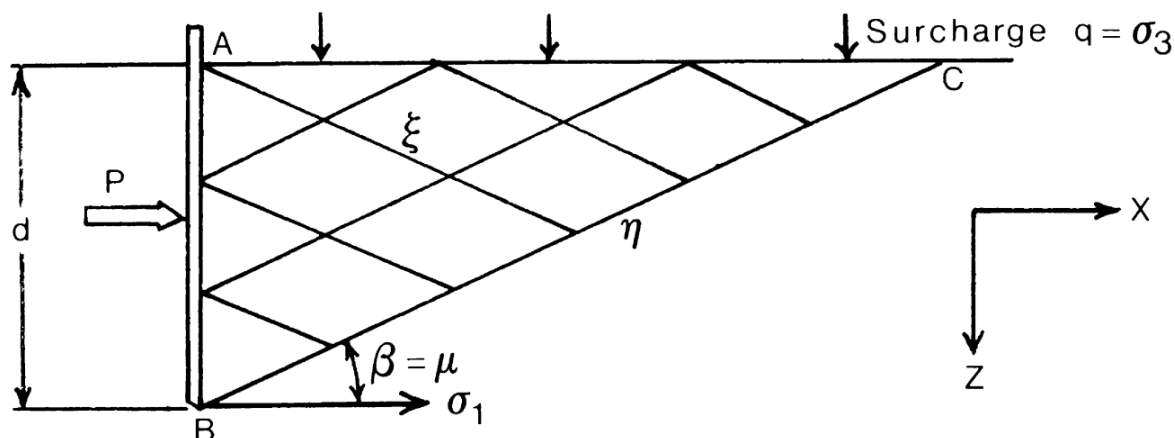
$$P = (\gamma g d^2 N_\gamma + c d N_c + q d N_q) w, \text{ gdzie:} \quad 2.14$$

P – całkowita siła działająca na narzędzie; γ – całkowita gęstość gleby; g – przyspieszenie ziemskie; d – głębokość pracy narzędzia poniżej powierzchni gleby; c – graniczna spójność gleby; q – ciśnienie spiętrzające działające pionowo na powierzchnię gleby; w – szerokość narzędzia; N_γ , N_c , N_q – współczynniki zależne nie tylko od wytrzymałości gleby na tarcie, ale także od geometrii narzędzia oraz od właściwości wytrzymałościowych gleby i narzędzia.

Zmienne dotyczące geometrii narzędzia, które wpływają na wielkość współczynników N , obejmują kąt nachylenia narzędzia względem poziomu, możliwe zakrzywienie kształtu narzędzia oraz stosunek głębokości do szerokości wąskiego narzędzia. Możliwe jest analityczne wyznaczanie dla różnej złożoności kształtów narzędzi współczynników N z równania 2.14, aby możliwe było przewidywanie sił cięcia gleby (przykładowy wykres na rys. 2.29). Dzięki temu możliwe by było projektowanie narzędzi tnących o odpowiedniej wydajności, z minimalnym wymaganym wkładem siły, bez konieczności powtarzania eksperymentów w laboratorium lub w terenie [37].

Metoda charakterystyk naprężeń [37]

Stosowana do analizowania przypadków dwuwymiarowych. Metoda charakterystyk naprężeń służy między innymi do wyznaczania rozkładów naprężeń w masie gleby, która ulega zniszczeniu, pod warunkiem, że znane są wystarczające właściwości gleby oraz znane są warunki brzegowe. Poniżej przytoczono przykładową analizę zagadnienia dla gładkiego, pionowego ostrza zagłębionego w glebie na głębokości d , która została zaprezentowana w książce „Soil Cutting and Tillage” autorstwa E. McKyes [37].



Rys. 2.28. Cięcie gleby gładkim, szerokim ostrzem pionowym [37]

W tym przykładzie naprężenia na powierzchni gleby AC są znane, ponieważ mniejsze naprężenie główne, σ_3 , jest równe naciskowi powierzchniowemu q , który jest równy lub większy od zera. Do przesunięcia ostrza w prawo, potrzebna jest siła P , która jest prostopadła do ostrza, ponieważ przyjęto, że ostrze jest idealnie gładkie i nie jest w stanie przenosić sił

ściągających równoległych do swojej powierzchni. Naprężenie przenoszone z powierzchni ostrza na głębę jest zatem głównym naprężeniem σ_1 i jest poziome wzdłuż pionowego ostrza AB. Na powierzchniach AB i AC główne naprężenia w glebie są poziome, a kąt θ wynosi 0.

Ponieważ kąt θ głównego naprężenia normalnego nie zmienia się w całym obszarze ABC, jest więc on stały i wynosi wszędzie zero. Linie charakterystyczne naprężeń mają stałe kąty $\pm\mu$ względem poziomu, jak pokazano na rys. 2.28. Dzięki temu równania mogą zostać uproszczone, ponieważ nie ma zmian kąta θ wzdłuż linii charakterystycznych ξ i η , a $\Delta\theta = 0$.

$$d\sigma = \gamma g(dz + tg\phi dx), \text{ wzdłuż linii } \xi \quad 2.15$$

$$d\sigma = \gamma g(dz - tg\phi dx), \text{ wzdłuż linii } \eta \quad 2.16$$

Dzieląc powyższe równanie przez dz , otrzymujemy,

$$\frac{d\sigma}{dz} = \gamma g \left(1 - tg\phi \frac{dx}{dz} \right) = \gamma g \left(1 + \frac{tg\phi}{tg\mu} \right) \quad 2.17$$

Ponieważ dx/dz jest odwrotnością nachylenia linii charakterystycznej, czyli $-tg\mu$. Wartość funkcji naprężenia, σ , jest znana na powierzchni gleby, AC, dla ustalonego nacisku powierzchniowego, q .

$$\sigma = \frac{(\sigma_3 + \psi)}{1 - \sin\phi} = (q + \psi)(1 - \sin\phi) \quad 2.18$$

Aby obliczyć naprężenia na czubku ostrza w punkcie B, należy jedynie scałkować powyższe równanie od punktu C do B wzdłuż linii η .

W punkcie B:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{q + \psi}{1 - \sin\phi} + \int_0^d \frac{d\sigma}{dz} dz = \frac{q + \psi}{1 - \sin\phi} + \int_0^d \gamma g \left(1 + \frac{tg\phi}{tg\mu} \right) dz \\ &= \frac{q + \psi}{1 - \sin\phi} + \gamma g \left(1 + \frac{tg\phi}{tg\mu} \right) d \end{aligned} \quad 2.19$$

Naprężenie na ostrzu w punkcie B jest głównym naprężeniem normalnym (σ_1), które można wyznaczyć w następujący sposób:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma(1 + \sin\phi) - \psi \\ &= (q + \psi) \left(\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) + \gamma g d \left(1 + \frac{tg\phi}{tg\mu} \right) (1 + \sin\phi) - cctg\phi\end{aligned}\quad 2.20$$

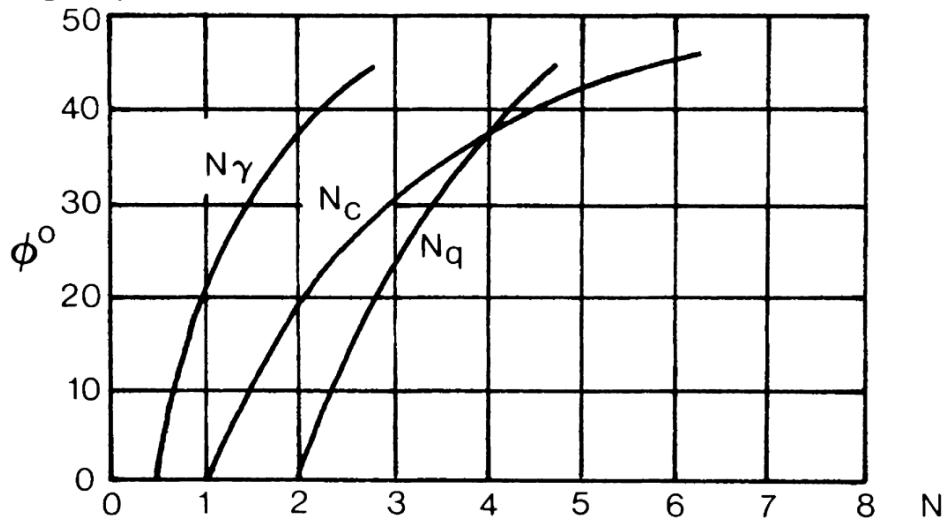
i wzdłuż ostrza AB, naprężenie zależy od głębokości, z.

$$\sigma_1 = (q + \psi) \left(\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) + \gamma g d \left(1 + \frac{tg\phi}{tg\mu} \right) (1 + \sin\phi) - cctg\phi \quad 2.21$$

Zatem całkowita siła narzędzia, P, na jednostkę szerokości całkuje się w następujący sposób:

$$\begin{aligned}P &= \int_0^d \sigma_1 dz = \gamma g d^2 \cdot \frac{1}{2} (1 + \sin\phi) \left(1 + \frac{tg\phi}{tg\mu} \right) + cdctg\phi \left[\left(\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) - 1 \right] \\ &\quad + qd \left(\frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \right) = \gamma g d^2 N_\gamma + cdN_c + qdN_q\end{aligned}\quad 2.22$$

Powyższe równanie dla analizowanego zagadnienia przekształca się w postać uniwersalnego równania do przemieszczania ziemi autorstwa Reece'a.



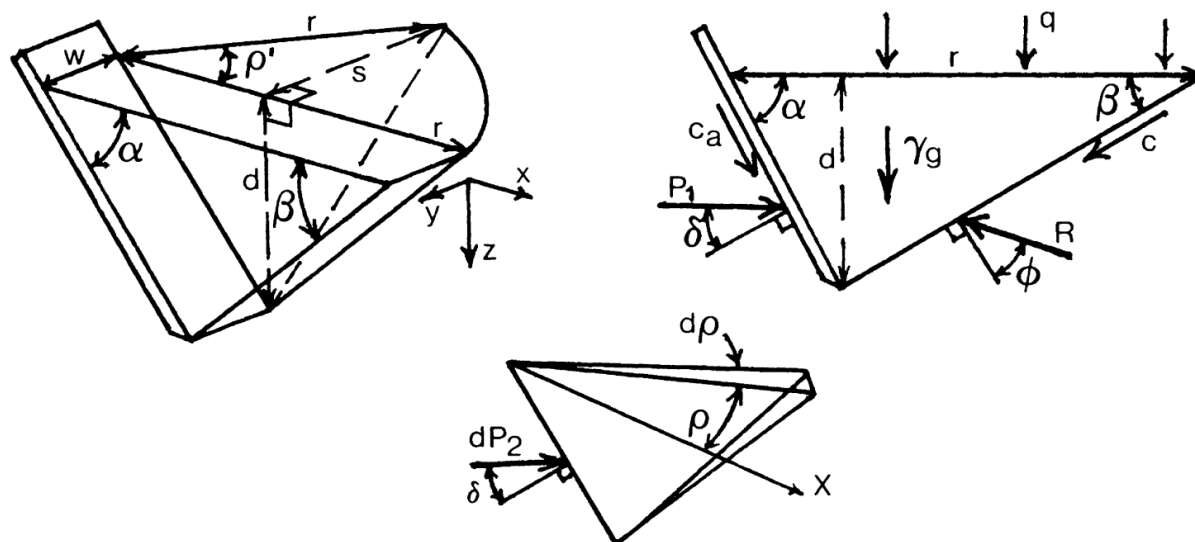
Rys. 2.29. Współczynniki N jako funkcja kąta wewnętrznego tarcia gleby ϕ dla gładkiego, szerokiego pionowego ostrza.

Rys. 2.29 przedstawia trzy współczynniki N jako funkcję kąta tarcia wewnętrznego gleby, co pozwala na przewidywanie siły narzędzia, P , przy użyciu wyprowadzonego powyżej równania. Powyższa metoda dotyczy opisu kontaktu gleby z narzędziem przy założeniu, że ruch skrawanej gleby odbywa się w dwóch kierunkach. Do rozwiązywania zagadnień

trójwymiarowych, gdzie gleba porusza się w trzech kierunkach koniecznym jest skorzystanie z innych metod – przykładową przytoczono poniżej.

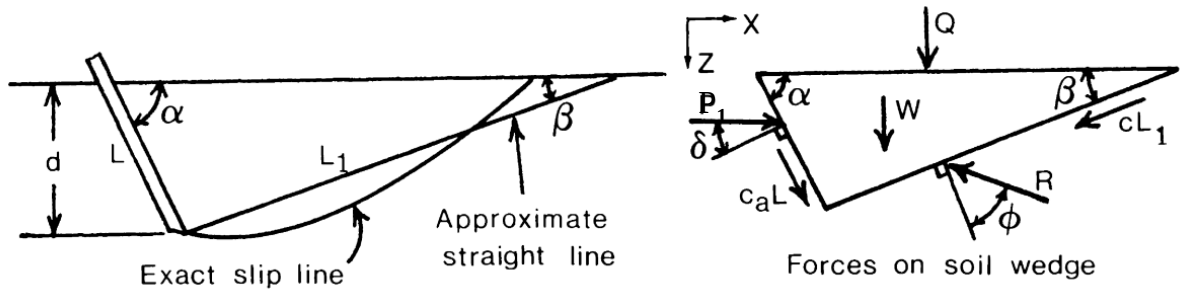
Metoda zaproponowana przez McKyesa i Ali [37]

Metoda (rys. 2.30) zakłada, że przed narzędziem zakłada się występowanie klinowej strefy o szerokości ostrza w , obejmującej nieokreślony kąt zniszczenia gleby β . Po obu stronach ostrza znajduje się segment kołowy o promieniu r , rozciągający się do punktu naprzeciwko dolnego końca ostrza. Wymiary r i s zależą od kąta klina β . Poprzez ustalenie odpowiedniego kąta klina, w funkcji ilości przesuwanej gleby, wpływ smukłości narzędzia oraz konieczność przesunięcia gleby na boki ostrza mogą wpływać na wartość krytycznego kąta klina. Kąt β jest też funkcją kąta natarcia narzędzia oraz wytrzymałości gleby.



Rys. 2.30. Trójwymiarowy model cięcia gleby McKyesa i Ali, pokazujący siły i naciski działające na strefę centralną oraz elementarny segment o włączonym kącie dp w bocznym półksiężycu [37]

Strefa centralna wymaga siły P_1 do przesunięcia narzędzia (równanie 2.23). Wyprowadzenie wzoru szczegółowo opisano w przytoczonym źródle. Odnośnikiem do wzoru (2.23) jest rys. 2.31.



Rys. 2.31. Teoria ścinania gleby narzędziem zaproponowana przez McKeya [37]

$$P_1 = \frac{W + Q + cd[1 + ctg\beta ctg(\beta + \phi)] + c_a d[1 - ctg\alpha ctg(\beta + \phi)]}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta)ctg(\beta + \phi)} \quad 2.23$$

Dla jednolitej gleby z równomiernym obciążeniem powierzchniowym q :

$$W = \gamma g \frac{d^2}{2} (ctg\alpha + ctg\beta) \quad 2.24$$

$$Q = qd(ctg\alpha + ctg\beta) \quad 2.25$$

Dla każdego elementarnego segmentu o kącie $d\rho$, siły można rozłożyć tak, aby znaleźć dP_2 w podobny sposób. Obszary na górze i z przodu każdego segmentu są trójkątne i mają wielkości równe długości razy połowa ich maksymalnej szerokości. Objętość segmentu wynosi jedną szóstą objętości prostopadłościanu o tych samych maksymalnych wymiarach.

$$dP_2 = \frac{\left[\frac{1}{6} \gamma g d r^2 + \frac{1}{2} c r d (1 + ctg\beta ctg\{\beta + \phi\}) + \frac{1}{2} q r^2 \right] d\rho}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta)ctg(\beta + \phi)} \quad 2.26$$

Rozkładając wszystkie elementarne siły na płaszczyznę x-z i całkując po całym włączonym kącie ρ' każdej strony.

$$P_2 = \frac{\left[\frac{1}{6} \gamma g d r^2 + \frac{1}{2} c r d (1 + ctg\beta ctg\{\beta + \phi\}) + \frac{1}{2} q r^2 \right] \sin\rho'}{\cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta)ctg(\beta + \phi)} \quad 2.27$$

Całkowita siła tnąca glebę P działająca na ostrze składa się z siły P_1 działającej na strefę centralną oraz z sił P_2 , działających z każdej strony w płaszczyźnie x-z.

$$P = P_1 + 2P_2 = \quad 2.28$$

$$= \frac{\left\{ \gamma g d^2 \frac{r}{2d} \left[1 + \frac{2s}{3w} \right] + cd \left[1 + ctg\beta ctg(\beta + \phi) \right] \left[1 + \frac{s}{w} \right] + qd \frac{r}{d} \left[1 + \frac{s}{w} \right] + c_a d \left[1 - ctg\alpha ctg(\beta + \phi) \right] \right\} w}{\{ \cos(\alpha + \delta) + \sin(\alpha + \delta) ctg(\beta + \phi) \}}$$

$$= (\gamma g d^2 N_\gamma + cd N_c + qd N_q + c_a d N_{ca}) w$$

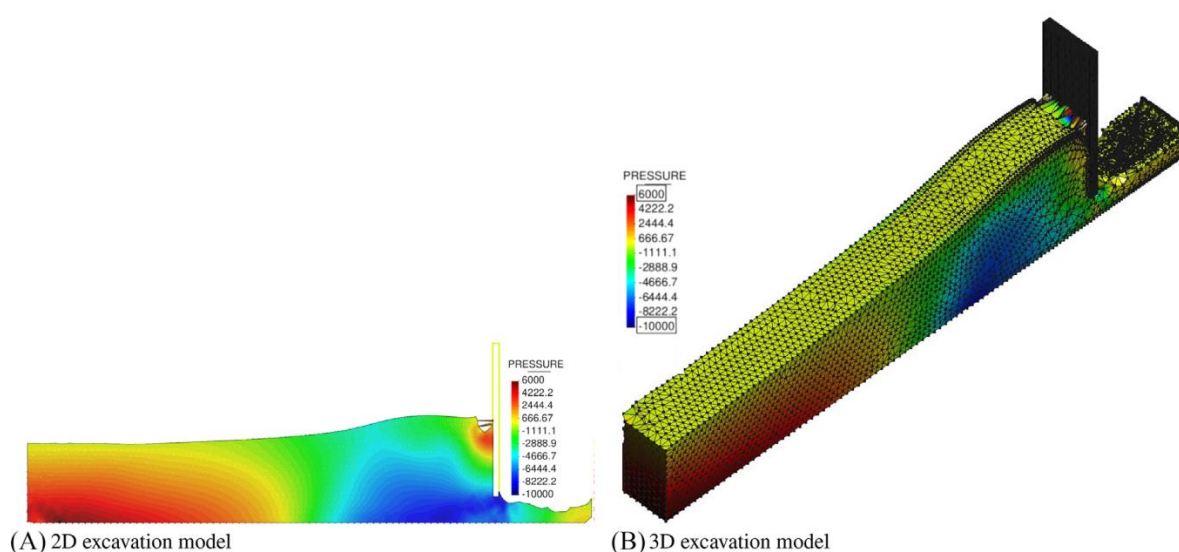
Model ten daje wyrażenie na siłę cięcia, które uwzględnia efekt bocznego przemieszczania gleby oraz stosunek głębokości do szerokości narzędzia.

2.4.2. Metody numeryczne

2.4.2.1. Metoda elementów skończonych

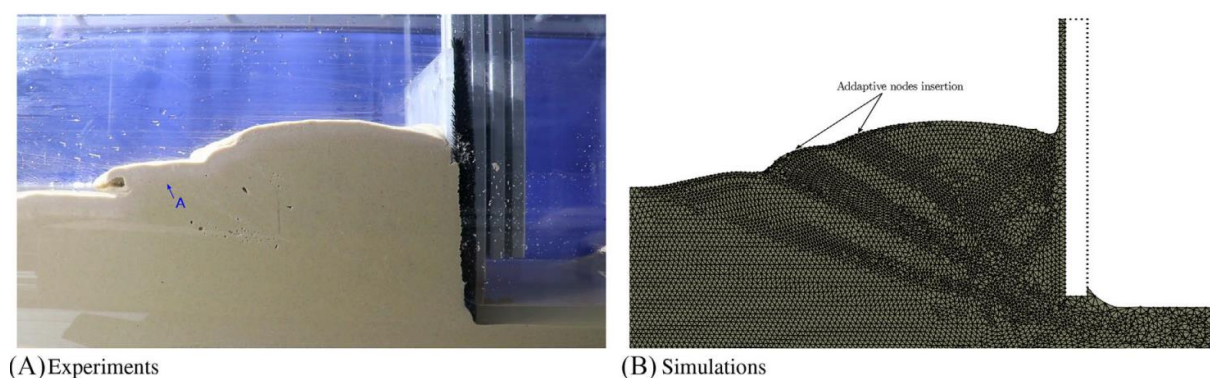
Znanych jest w literaturze wiele przykładów zastosowania metody elementów skończonych do modelowania kontaktu narzędzie – gleba oraz analizowanie w ten sposób zjawisk związanych z tym procesem. Jak podają autorzy przytoczonych publikacji zastosowana przez nich metoda PFEM (ang. Particle Finite Element Method) jest zaawansowaną techniką numeryczną, która łączy zalety metody elementów skończonych (FEM) z metodą cząsteczkową (Particle Method), umożliwiając symulację dużych deformacji i dynamicznych procesów w materiałach ciągłych (rys. 2.32). PFEM wykorzystuje elementy skończone do modelowania ciał ciągłych, ale traktuje węzły jako cząstki, które mogą przemieszczać się swobodnie i rekonfigurować siatkę podczas symulacji. Siatka jest regularnie rekonstruowana (remeshing), aby dokładnie odwzorować duże deformacje i zmiany topologii materiału. Jest szczególnie przydatna do modelowania problemów z dużymi deformacjami, takich jak przepływy płynów, procesy erozyjne, wykopy czy upłynnianie gruntu. Ponadto daje możliwość symulowania interakcji między ciałami stałymi a płynami, co znajduje zastosowanie między innymi w mechanice gruntów [119–121].

Autorzy artykułu zastosowali model hydromechaniczny oparty na teorii mediów porowatych, uwzględniający zarówno szkielet stały gleby, jak i fazę płynną. Modelowanie interakcji narzędzie-gleba jest realizowane poprzez formułę constraints continuum method (CCM), która umożliwia dokładne odwzorowanie kontaktu między narzędziem a glebą. Wprowadzają lokalną adaptacyjną strategię rafinacji siatki opartą na wskaźniku dylatacji gleby, co pozwala na dokładniejsze uchwycenie lokalizacji stref deformacji ścinających podczas procesu cięcia aktywując procedury dodawania węzłów w miejscach lokalizacji deformacji. [119,120].



Rys. 2.32. Analiza 3D PFEM kontaktu narzędzia-gleba przy całkowicie nasyconym gruncie: Przestrzenny rozkład ciśnień porowych [Pa] w średnio gęstym piasku przy posuwie narzędzia $Sx = 360$ mm. (A) Modele 2D i (B) 3D PFEM [120]

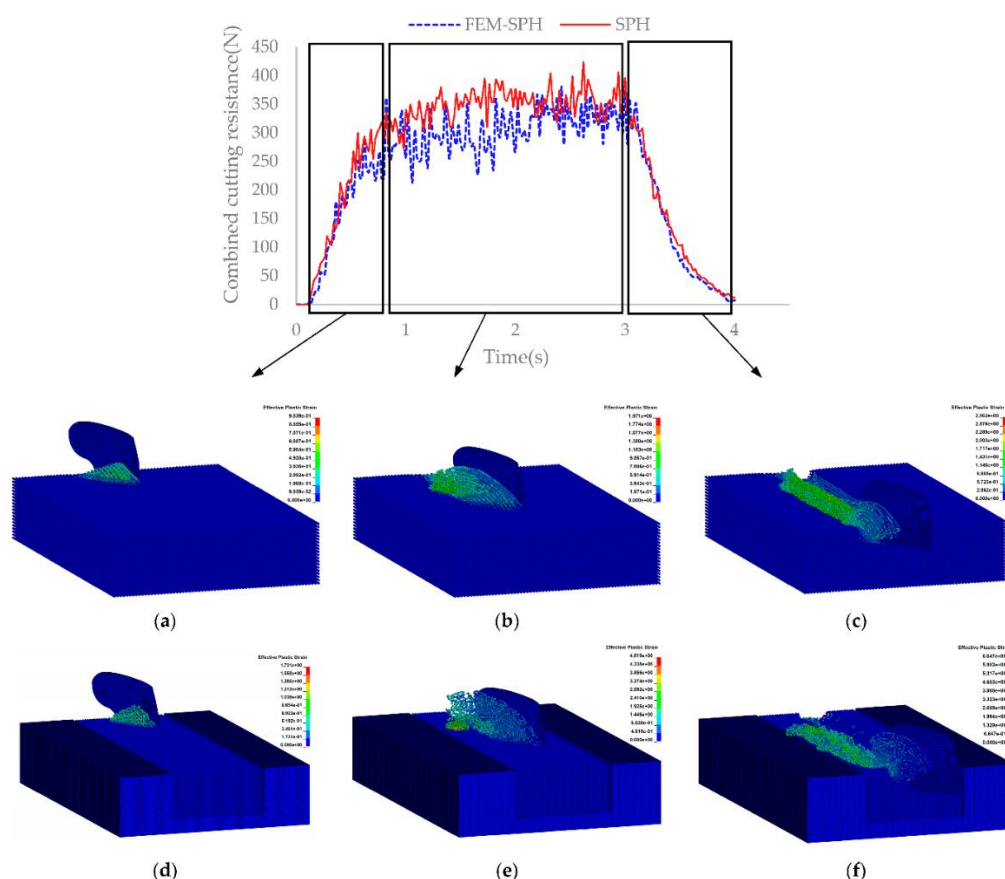
Autorzy porównali krzywe siła-przemieszczenie narzędzia oraz zmiany zdeformowanej topologii piasku uzyskane z modelu komputerowego, w tym formowanie się stref ścinania z odpowiednimi obserwacjami eksperymentalnymi na stanowisku badawczym (rys. 2.33).



Rys. 2.33. Odkształcenie gruntu podczas wydobywania początkowo w pełni nasyconego gęstego piasku przy poziomym przemieszczeniu narzędzia wynoszącym $Sx = 250$ mm: (A) Eksperyment, (B) model obliczeniowy [120]

Kolejnym przykładem modelowania interakcji pomiędzy narzędziem a gruntem jest metoda sprzężona FEM – SPH. Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) to metoda numeryczna używana do symulacji dynamicznych procesów, takich jak przepływy płynów, zjawiska falowe, interakcje ciał stałych i cieczy oraz inne zjawiska, które obejmują duże deformacje i swobodne powierzchnie. Metoda ta opiera się na cząsteczkach, które reprezentują

właściwości materiału i poruszają się zgodnie z równaniami ruchu. Autorzy publikacji wskazują na wydajność obliczeniową metod. Jak podają na obliczenie tego samego problemu tj. zasymulowania interakcji pomiędzy pługiem a glebą, model SPH potrzebuje ponad 5 godzin, podczas gdy model sprzężony FEM-SPH potrzebuje na obliczenia 38 minut. Wydajność obliczeniowa modelu sprzężonego FEM-SPH jest znacznie wyższa ma to jednak wpływ na wielkość błędu. Względne błędy między modelem SPH, a eksperymentem wynoszą odpowiednio 2,17% i 3,65%. Względne błędy między modelem sprzężonym FEM-SPH, a eksperymentem wynoszą odpowiednio 5,96% i 10,67% (rys. 2.34) [122,123]. Stosowanie metod obliczeniowych opartych na metodzie elementów skończonych pozwala na szybkie i niezależne od warunków zewnętrznych szacowanie obciążeń generowanych w czasie obróbki mechanicznej gleby.



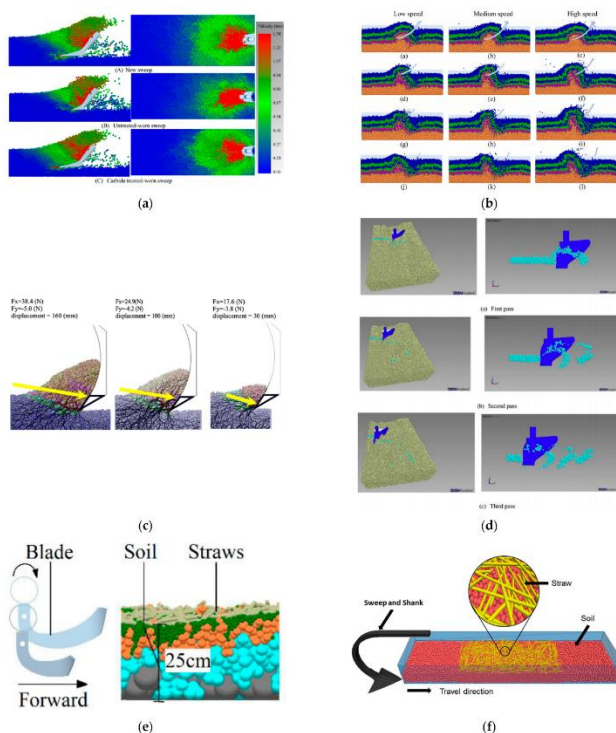
Rys. 2.34. Proces cięcia i opór cięcia gleby w oparciu o model SPH i sprzężony model FEM-SPH, gdzie: Model SPH: (a) $t = 0,74$ s, (b) $t = 2,02$ s, (c) $t = 3,78$ s; Model FEM-SPH: (d) $t = 0,74$ s, (e) $t = 2,02$ s, (f) $t = 3,78$ s [122]

Metoda SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) i metoda PFEM (Particle Finite Element Method) są odrębnymi, ale komplementarnymi metodami numerycznymi. Przegląd zastosowań

metody obliczeniowej został wykonany w kontekście ogólnych zastosowań rolniczych. Analizowane źródła wskazują jednak, że w przypadku konieczności otrzymywania jak najdokładniejszego odwzorowania modelowanych zjawisk fizycznych dotyczących materiałów typu gleba czy płyny dedykowana jest metoda elementów dyskretnych.

2.4.2.2. Metoda elementów dyskretnych

Metoda elementów dyskretnych (DEM ang. discrete element method) to numeryczna technika modelowania interakcji między oddzielnymi ciałami lub cząstkami. DEM jest szeroko stosowana do symulacji procesów związanych z materiałami ziarnistymi, takimi jak gleba, piasek, ziarna zbóż, kruszywa i inne sypkie materiały oraz różnego rodzaju ciecze. Kluczowymi aspektami DEM są sposób reprezentacji cząstek materiałów, interakcje między nimi symulując dynamiczne warunki w skalowalnych zastosowaniach od problemów makroskopowych po symulowanie całych systemów [124–126].



Rys. 2.35. Przykłady modelowania typowych narzędzi uprawowych w badaniach SPMI: (a) gęsiostopa; (b) głębosz; (c) szeroki lemiesz tnący; (d) pług odkładnicowy; (e) lemiesz obrotowy; oraz (f) gęsiostopa w glebie z resztkami poźniwnymi [127]

Autorzy przytoczonego artykułu przedstawiają badania nad interakcją między narzędziami uprawowymi typu gęsiostopki a glebą przy użyciu metody elementów dyskretnych (DEM). Głównym celem ich badań było symulowanie interakcji narzędzie-gleba oraz ocena wpływu zużycia krawędzi narzędzi na siły oporu gleby i jakość struktury gleby. Porównano

trzy warianty zastosowanego narzędzia: nowe, zużyte oraz narzędzie pokryte węglkami spiekanyymi na powierzchni ostrza. W badaniach zastosowano modelowanie 3D poprzez zeskanowanie narzędzi za pomocą skanera laserowego odwzorowując w ten sposób nowe i zużyte narzędzie w modelu CAD3D, które następnie zostały zaimportowane do oprogramowania EDEM, którego użyto do symulacji DEM. Kalibracja modelu DEM została przeprowadzona za pomocą parametrów Hertza-Mindlina z modelem równoległego wiązania, aby dopasować siły ciągu i strefy uszkodzeń gleby zmierzone w eksperymentach. Eksperymenty w glebie przeprowadzono w kontrolowanym środowisku, w kanale glebowym. W trakcie eksperymentów mierzono siły oporu gleby oraz odległość uszkodzeń gleby, co posłużyło do walidacji modelu DEM [128].

Kolejnym przykładem zastosowania metody DEM do symulowania zachowania narzędzi w czasie obróbki mechanicznej gleby jest przytoczona publikacja, której głównym celem było właśnie stworzenie modelu interakcji gleba-narzędzie-słoma, który mógłby być użyty do symulacji ruchu słomy w warunkach uprawy konserwującej. Autorzy zbudowali model DEM przy użyciu oprogramowania Particle Flow Code in Three Dimensions (PFC3D), który symulował interakcje między glebą, narzędziem (typu gęsiostopka) i słomą. Model uwzględniał warstwę gleby i warstwę słomy. W prowadzonych badaniach analizowane były dynamiczne atrybuty, takie jak obszar poruszania się gleby i słomy, przykrycie resztkami roślinnymi, energia kinetyczna, prędkość, przyspieszenie, przemieszczenie i trajektoria ruchu słomy. Kalibracja modelu polegała na dopasowaniu parametrów sztywności kul gleby (elementów dyskretnych) i skupisk słomy do wartości uzyskanych z modeli analitycznych oraz danych eksperymentalnych. Wyniki symulacji porównano z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi w teście przeprowadzonym w kanale glebowym. Model wykazał ogólny błąd względny wynoszący 7,3% w porównaniu do przewidywanych przemieszczeń słomy i pokrycia resztkami roślinnymi [129].

Prowadzone są badania mające na celu opracowanie wysokiej jakości modelu, który mógłby opisywać interakcje narzędzie-gleba oraz służyć jako narzędzie symulacyjne przy projektowaniu narzędzi uprawowych. W artykule wykorzystano dwuwymiarowy kod elementów dyskretnych PFC2D, aby symulować interakcje między glebą a szerokim ostrzem tnącym. Model gleby został opracowany przy użyciu klastrów dwudyskowych, które

naśladowały cząstki gleby z siłami kohezji pomiędzy nimi. Przeanalizowano cztery różne kształty ostrzy oraz ich wpływ na siły i mieszanie gleby: paraboliczne z dużym i małym promieniem wygięcia, pionowe i proste. Analogicznie jak w poprzednio przytoczonych publikacjach model został zweryfikowany eksperymentalnie w kanale glebowym wypełnionym piaskiem. Wyniki symulacji wykazały dobrą korelację z wynikami eksperymentów. Procentowe odchylenie energii między eksperymentami i symulacjami dla dwóch głębokości cięcia do odległości 0,15 m wahały się w przedziale od 2,35–12,12%. Wyniki symulacji wykazały, że krzywa obciążeń narzędzi może być w przybliżeniu opisana linią prostą, jak zakładają klasyczne teorie. Publikacja potwierdza, że metoda elementów dyskretnych (DEM) jest skutecznym narzędziem do modelowania interakcji narzędzie-gleba, które może służyć do optymalizacji projektowania narzędzi uprawowych. Przeprowadzone badania pokazują, że DEM może dokładnie symulować procesy dynamiczne związane z cięciem gleby [130].

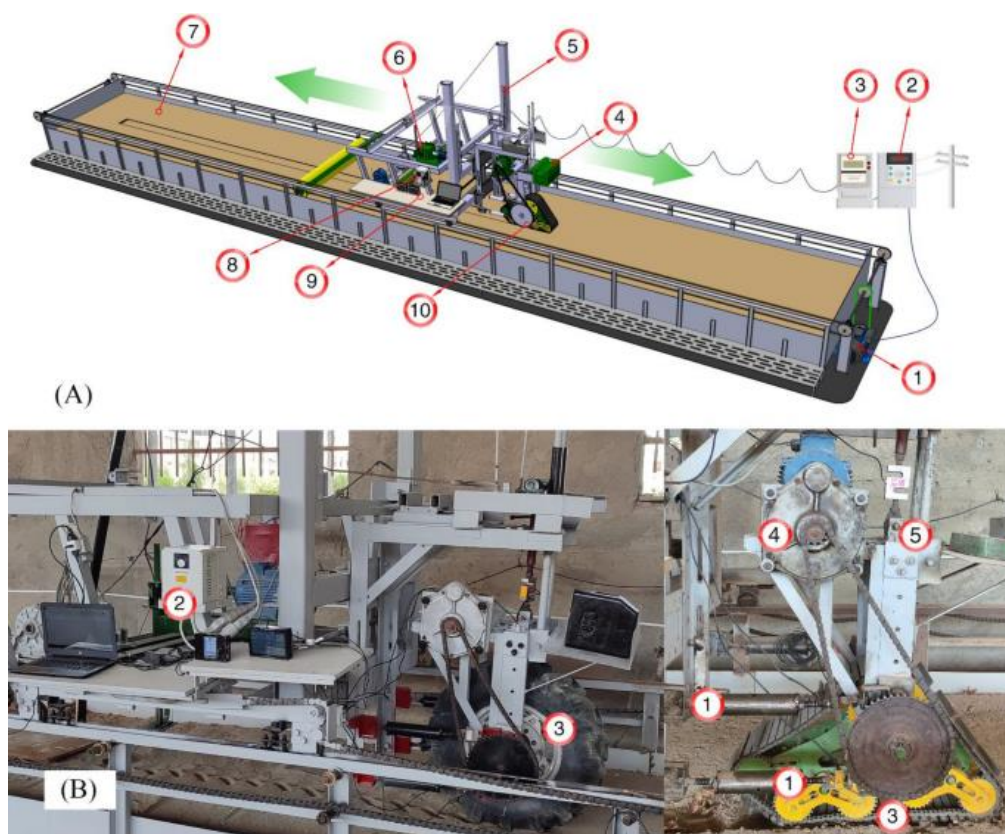
Przytoczone przykłady symulowania interakcji między narzędziem a glebą były odnoszone do badań eksperymentalnych, które w sposób najbliższy rzeczywistości opisują problemy związane z identyfikowaniem zachowania narzędzi oraz obciążeń generowanych w czasie procesu.

2.4.3. Metody eksperymentalne

Jest to grupa metod, która polega na wyposażeniu przedmiotu poddawanego badaniom w odpowiednie czujniki, dostosowane do spodziewanych warunków pracy narzędzia np. pod względem zakresu pomiarowego, rozdzielczości, rodzaju sygnału itd. W przypadku analizowania obciążeń narzędzi roboczych maszyn rolniczych, w oparciu o źródła literaturowe, można wyodrębnić dwie główne kategorie badań eksperymentalnych ze względu na środowisko testowe:

- badania w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych – przeprowadzane w laboratoriach w tak zwanych kanałach glebowych (rys. 2.36), gdzie warunki takie jak wilgotność gleby, jej skład i struktura, a także temperatura, mogą być precyzyjnie kontrolowane i modyfikowane. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie dokładnych, powtarzalnych wyników oraz szczegółowe zrozumienie specyficznych interakcji między narzędziem a glebą [128–135].

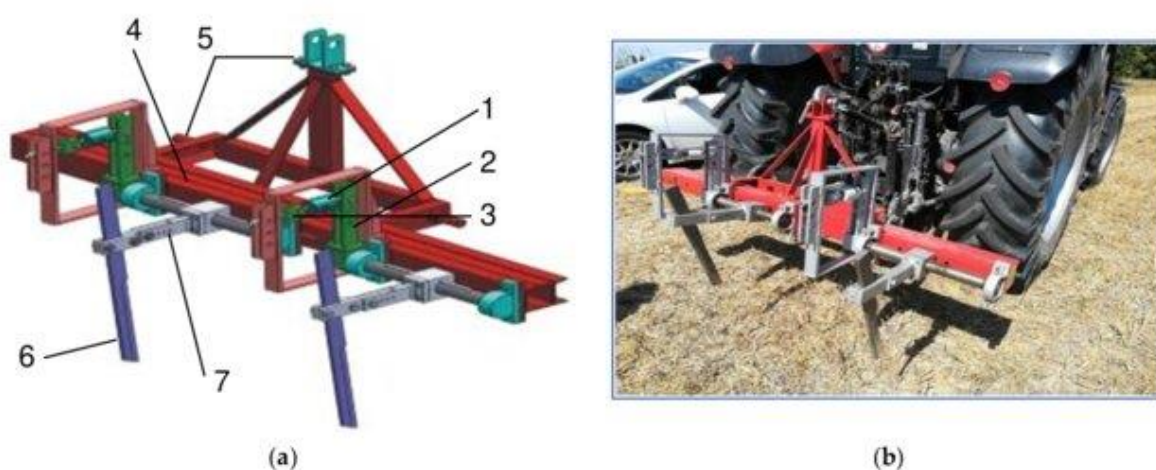
- Badania w warunkach operacyjnych (rzeczywistych dla danego narzędzia) – przeprowadzane bezpośrednio w polu, w rzeczywistych warunkach pracy, w których narzędzie będzie używane. Uwzględniają one rzeczywiste zmienne, takie jak różnorodność typów gleby, zmienne warunki pogodowe i rzeczywiste operacyjne obciążenia narzędzi. Badania te są prowadzone przy użyciu specjalistycznych urządzeń pomiarowych (rys. 2.37) i są kluczowe dla oceny wydajności narzędzi w realistycznych scenariuszach [136–145].



Rys. 2.36. Przykładowy kanał glebowy do badań interakcji między urządzeniami rolniczymi a glebą [133]

Podział ze względu na środowisko testowe wskazuje na fakt, że część prowadzonych badań eksperymentalnych może różnić się od siebie wynikami ze względu na zastosowane uproszczenia związane choćby z zagęszczaniem gleby przed badaniami w przypadku badań laboratoryjnych, czy strukturą samej gleby. Testy prowadzone w warunkach rzeczywistych pozwalają na kompleksowe zrozumienie zachowania narzędzi rolniczych w realistycznych warunkach. Niemniej oba rodzaje badań są niezbędne do optymalizacji i poprawy efektywności

pracy narzędzi w różnych warunkach polowych – każda z tych metod ma swoje zalety. Dla każdej ze scharakteryzowanych metod powyżej kluczowe jest właściwe zaprojektowanie układu pomiarowego w zależności od badanego zjawiska. Eksperymentalne wyznaczanie obciążeń, analizowanie reakcji narzędzi roboczych maszyn rolniczych oraz ich interakcji z glebą wymaga stosowania specjalistycznych urządzeń pomiarowych. Wymienione parametry są jednymi z kluczowych składników w optymalizacji konstrukcji i efektywności działania narzędzi oraz maszyn rolniczych. Ich pomiar możliwy jest poprzez zastosowanie następujących urządzeń lub metod pomiarowych.



Rys. 2.37. Przyrząd pomiarowy do eksperymentalnego badania obciążeń narzędzi w glebie [140]

Czujniki tensometryczne

Tensometry służą do pomiaru odkształceń materiałowych, które następnie przekształca się na wartości sił. Są one często montowane na narzędziach rolniczych w miejscach przewidywanych największych naprężeń, co pozwala na precyzyjne określenie sił ciągu, sił oporu gleby i momentów skręcających. Najczęściej spotykaną metodą pomiaru jest jednak nie klejenie tensometrów na konstrukcji ale projektowanie stanowisk umożliwiających stosowanie czujników S-kształtnych działających w oparciu o tensometrię oporową – dzięki temu warunki badań są powtarzalne i nieingerujące w badany obiekt. Wyskalowane czujniki poprzez układy wzmacniaczy pozwalają interpretować wyniki w postaci sił lub momentów skręcających oraz pomiary z różnymi częstotliwościami [128,130,141].

Dynamometry

Grupa czujników obecnie rzadko spotykanych z uwagi na znaczący rozwój i upowszechnienie metod tensometrycznych. Dynamometry bezpośrednio mierzą siły działające na narzędzia. Montuje się je między maszyną a narzędziem, na przykład między ciągnikiem a pługiem, aby zmierzyć siły uciągu i siły oporu gleby podczas rzeczywistej pracy w polu [37].

Analiza obrazu

Metody te wykorzystują kamery i oprogramowanie do analizy obrazu w celu pomiaru przemieszczeń i deformacji gleby oraz narzędzi podczas pracy. Umożliwiają one wizualizację i analizę przepływu gleby oraz kształtu strefy skrawania [134,146].

Akcelerometry

Akcelerometry, czyli czujniki mierzące przyspieszenia, odgrywają istotną rolę w badaniach narzędzi polowych w rolnictwie. Te precyzyjne urządzenia są wykorzystywane do monitorowania dynamicznych sił i ruchów narzędzi rolniczych podczas pracy w glebie. Dzięki akcelerometrom możliwe jest dokładne analizowanie drgań i wibracji narzędzi, co pozwala zrozumieć, jak różne warunki glebowe wpływają na ich wydajność i zużycie. Ponadto, akcelerometry umożliwiają również pomiar przyspieszeń narzędzi podczas kontaktu z glebą, co pozwala na dokładne obliczenie lub weryfikowanie sił działających na narzędzia. Monitorowanie trajektorii ruchu narzędzi rolniczych za pomocą akcelerometrów pozwala na analizę ich zachowania podczas pracy, co pomaga w identyfikacji problemów związanych z nieprawidłowym ruchem narzędzi i ich interakcją z glebą [135,147].

Urządzenia do identyfikacji kluczowych parametrów gleby

Prowadzenie badań eksperymentalnych w kierunku analizowania obciążeń narzędzi w warunkach operacyjnych niesie za sobą konieczność określania parametrów zewnętrznych dla badanych układów. Urządzenia do identyfikacji kluczowych parametrów gleby odgrywają istotną rolę w badaniach narzędzi rolniczych, umożliwiając dokładną ocenę warunków glebowych i późniejsze odniesienie ich do zarejestrowanych danych. Czujniki nazywane penetrometrami mierzą opór gleby na penetrację, co pozwala na ocenę jej twardości i wytrzymałości. Te urządzenia są używane do określania siły potrzebnej do wniknięcia

narzędzi rolniczych w glebę [138,148]. Często wyposażane są w dodatkową funkcję pomiaru wilgotności gleby, która bezpośrednio wpływa na wielkość i charakter obciążeń. Urządzeniami dedykowanymi do takich pomiarów są tensjometry, które mierzą potencjał wody w glebie, a na tej podstawie wilgotność i zdolność do przenoszenia wody [149,150].

3. Podsumowanie stanu zagadnienia oraz cele pracy

3.1. Uzasadnienie podjęcia tematu

Przeprowadzona analiza literatury związanej z pieleniem mechanicznym wskazuje na istotność oraz zapotrzebowanie na wdrażanie przyjaznych ekologicznie metod odchwaszczania. Jest to możliwe między innymi dzięki rozwojowi technologicznemu maszyn rolniczych. Jednym z powodów podjęcia się tematyki doktoratu było doświadczenie pracodawcy z zakresu projektowania zaawansowanych autonomicznych pojazdów polowych. Stosowanie robotów na polach uprawnych ma na celu przede wszystkim odciążanie użytkowników, umożliwiając ciągłą pracę tych maszyn z postojami wynikającymi z konieczności przeprowadzenia prac eksploatacyjnych lub związanych z uzupełnieniem paliwa lub ładowaniem baterii w zależności od typu zastosowanego napędu. Dążenie do jak najrzadszych postojów tych maszyn jest oczywiste, stąd pomysł podjęcia próby zmniejszania obciążeń narzędzi roboczych, które wpływają na zużycie energii przez roboty rolnicze. Mechatroniczna sekcja pielęgnująca z narzędziem o zmiennej geometrii jest również odpowiedzią na trendy nowoczesnego rolnictwa jak np. rolnictwo precyzyjne lub rolnictwo 4.0, które zakładają możliwość dostosowywania procesów w zależności od lokalnych warunków polowych oraz umożliwiając zbieranie danych, które służą w dalszej kolejności do optymalizowania procesów choćby przy użyciu algorytmów sztucznej inteligencji. Podjęty przeze mnie temat analizowania geometrii elementów skrawających glebę ma przyczynić się do ulepszania procesu pielenia mechanicznego zwiększając jego efektywność oraz precyzję dzięki nowoczesnym rozwiązaniom technicznym. Temat doktoratu wdrożeniowego jest również spójny z kierunkami rozwoju pracodawcy, co miało duży wpływ na podjęcie się tej tematyki.

3.2. Problematyka naukowa oraz luka badawcza

Główna problematyka naukowa tematu doktoratu dotyczy przebadania zaprojektowanej mechatronicznej sekcji pielącej wyposażonej w narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających glebę w celu wykazania różnic pomiędzy narzędziem konwencjonalnym a zaproponowanym w ramach doktoratu narzędziem mechatronicznym. Działanie to ma na celu wykazanie możliwości adaptowania narzędzia do lokalnych warunków występujących na polu – w ten sposób zmniejszając obciążenia generowane przez narzędzia pielące a w następstwie ograniczając ich zużycie oraz zmniejszając energochłonność procesu.

Aby móc przystąpić do badań związanych z realizacją głównego problemu badawczego koniecznym było rozwiązanie pomniejszych problemów badawczych m. in. zaprojektowanie narzędzia pielącego umożliwiającego zmianę geometrii elementów skrawających, połączonego z sekcją pielącą wyposażoną w elementy automatycznego dostosowywania głębokości pielenia. Sterowanie urządzeniami ma na celu umożliwienie zmiany nastaw parametrów wyszczególnionych w analizie literaturowej, które są kluczowe dla prawidłowego pielenia mechanicznego.

Koniecznym było opracowanie metodyki badawczej urządzenia oraz opracowanie architektury układu sterowania, umożliwiającej sterowanie urządzeniem oraz rejestrowanie danych z czujników.

Przeprowadzona analiza literatury wykazała, że geometria narzędzi wpływa nie tylko na wielkość generowanych obciążeń ale również na poprawność pielenia mechanicznego rozumianą choćby jako łatwość zagłębiania się ostrzy tnących na stałej głębokości pielenia – ma na to wpływ między innymi kąt skrawania α . Ponadto jest ona zależna w dużej mierze od parametrów skrawanej powierzchni takich jak spójność (kohezja) gleby, kąt tarcia wewnętrznego gleby oraz zwięzłość gleby – najważniejszym parametrem wpływającym na wspomniane wcześniej parametry jest wilgotność gleby. Przytoczona w pracy literatura podaje orientacyjne, charakterystyczne, kąty geometrii narzędzi dla różnych typów gleby podkreślając, że narzędzia powinny być dostosowywane pod dane warunki polowe. Zaprojektowane narzędzie o zmiennej geometrii posiada możliwość zmiany kątów ostrzy skrawających glebę zapewniając tym samym możliwość dostosowania ich do lokalnych warunków panujących na polu. Problemem badawczym było połączenie mechatronicznego narzędzia umieszczonego na sekcji pielącej wyposażonej w funkcję automatycznej regulacji głębokości pielenia pozwalając

dostosowywać kąty narzędzia. Wzięto pod uwagę możliwość połączenia urządzenia ze sterownikami nadrzędnymi umożliwiającymi rozwijanie tematu o pracę z mapami aplikacyjnymi, które tworzone są na potrzeby rolnictwa precyzyjnego. W ten sposób możliwe będzie ustawienie wstępnych kątów narzędzi, które mogą być w dalszym ciągu korygowane w zależności od np. stopnia zachwaszczenia, stwierdzenia występowania skorupy glebowej lub innych charakterystycznych czynników wpływających na pielenie.

Problemem badawczym było wykazanie w czasie przeprowadzonych badań eksperymentalnych różnic między badanymi narzędziami, wskazując na możliwość ciągłego regulowania parametrów procesu w celu zmniejszania jego energochłonności. Koniecznym było zaprojektowanie układu pomiarowo – wykonawczego zawierającego autorskie czujniki obciążeń narzędzi.

W miarę prowadzonej analizy literatury zdefiniowano kolejny problem badawczy jakim było umożliwienie wprowadzenia dodatkowej funkcjonalności urządzeniu, a mianowicie formowaniu powierzchni gleby w sposób umożliwiający przeciwdziałanie erozji wodnej gleb. Koniecznym było przeprowadzenie analiz kinematyki mechatronicznej sekcji pielącej.

Podsumowując luką badawczą w realizowanym temacie jest stworzenie urządzenia umożliwiającego optymalizowanie procesu pielienia mechanicznego pod kątem zmniejszania obciążeń. Na podstawie przeprowadzonej analizy literaturowej można jednoznacznie stwierdzić celowość projektowania narzędzia zmieniającego geometrię. Ponadto, nie stwierdzono, żadnych podobnych rozwiązań w zakresie stworzenia narzędzia adaptującego się do warunków polowych co wskazuje na wysoki poziom innowacyjności prowadzonych badań. Ograniczanie obciążeń jest celowe ze względu na wydłużanie pracy nowoczesnych, autonomicznych pojazdów rolniczych, których magazyny energii potrafią stanowić bardzo znaczącą część kosztów maszyny.

3.3. Cele pracy

Prace nad analizą literaturową tematu przyczyniły się do nakreślenia następujących **celów badawczych**:

- Główny cel badawczy: Opracowanie mechatronicznej sekcji pielnika zmniejszającej energochłonność wykonywanego zabiegu agrotechnicznego.
- Cele szczegółowe (wpływające na osiągnięcie celu głównego):
 - opracowanie metody ciągłej analizy kluczowych parametrów związanych z obróbką gleby podczas pielienia mechanicznego (z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego projektowanego rozwiązania),
 - porównanie (wyznaczenie wskaźnika) energochłonności procesu pielienia mechanicznego za pomocą opracowaną sekcji mechatronicznej w odniesieniu do energochłonności zabiegu pielienia realizowanego za pomocą konwencjonalnej sekcji pielącej.

Cele wdrożeniowe dotyczyły zachowania kompatybilności opracowanego urządzenia z maszynami i pojazdami rolniczymi, zgodność z założeniami polityki zrównoważonego rozwoju oraz ochronę prawną rozwiązania.

3.4. Hipotezy badawcze

Na podstawie analizy literaturowej sformułowano następujące **hipotezy badawcze**:

- Zaprojektowana w ramach doktoratu wdrożeniowego konstrukcja narzędzia połączona z elementami automatyki w pielniku mechanicznym umożliwi zmianę geometrii narzędzi skrawających glebę przy prędkościach pielienia do 10 km/h w celu zmniejszenia oporów skrawania o 10% przy zachowaniu poprawności wykonania zabiegu agrotechnicznego.
- Odpowiednia kinematyka sekcji pielącej w połączeniu z czujnikami oraz elementami wykonawczymi umożliwi kształtowanie powierzchni gleby na terenach pofałdowanych w celu zmniejszenia erozji wodnej pól uprawnych.

4. Model badawczy czujnika do analizowania obciążeń narzędzi pielących

4.1. Wprowadzenie

Przeprowadzona we wcześniejszej części pracy analiza literatury przyczyniła się do podjęcia decyzji o prowadzeniu badań eksperymentalnych polowych, które dostarczą informacji na temat obciążeń narzędzi rolniczych. Do tego celu koniecznym było zaprojektowanie układu pomiarowego, a jego głównym elementem są czujniki tensometryczne do analizowania sił i momentów skręcających w trzech osiach.

Czujniki wieloosiowe znajdują zastosowanie w wielu dziedzinach, w których istotne jest monitorowanie realizowanych procesów, chroniąc w ten sposób konstrukcje przed przekroczeniem krytycznych obciążeń lub umożliwiając analizowanie obiektów badań. Takie podejście zapewnia możliwość identyfikowania charakteru pracy urządzeń oraz zapewnia swoistą kontrolę jakości. Czujniki tensometryczne analizujące wiele składowych obciążeń znajdują zastosowanie między innymi w przemyśle jako elementy centrów obróbkowych do analizowania parametrów obróbki skrawaniem. Oprócz kontroli jakości sensory służą do zabezpieczania narzędzi i konstrukcji maszyn. W robotyce czujniki wieloosiowe siły i momentów są stosowane w manipulatorach i chwytakach do pomiaru sił działających na przedmioty podczas chwytania, przenoszenia i manipulowania nimi. Pozwalają one na precyzyjne sterowanie siłami, zapobieganie uszkodzeniom obiektów oraz zapewnienie bezpieczeństwa podczas współpracy człowieka z robotem [151–154]. Czujniki wieloosiowe siły i momentów są używane do badania wytrzymałości materiałów i konstrukcji, mierzenia sił i momentów działających podczas testów zginania, rozciągania, ściskania, skręcania oraz innych prób mechanicznych. Pomagają one w ocenie właściwości materiałów, projektowaniu konstrukcji oraz zapobieganiu awariom i uszkodzeniom.

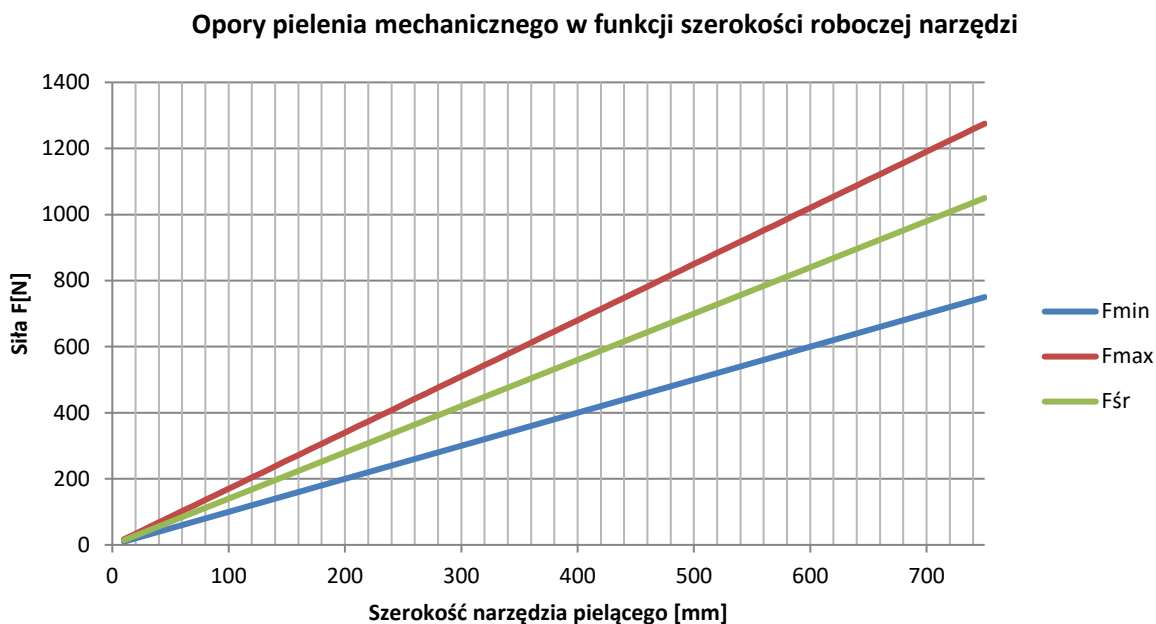
Analizując źródła literaturowe zaobserwowano wiele różnych typów konstrukcji czujników dostosowywanych do szczególnych zastosowań. Skupiono się na konstrukcjach, których elementem pomiarowym jest monoblok z odpowiednio rozmieszczonymi tensometrami na jego powierzchni. Ciekawym rozwiązaniem jest konstrukcja zaproponowana przez Yongjun Sun i in. [153], gdzie opracowany czujnik znajduje zastosowanie na robocie w przemyśle kosmicznym. Autorzy zaprezentowali odmienną geometrię czujnika opartą na najpowszechniej stosowanym kształcie krzyża maltańskiego. W porównaniu do zwykle stosowanej metody optymalizacji metodą prób i błędów, w artykule zaproponowano

zastosowanie metodyki powierzchni odpowiedzi (RSM, ang. response surface methodology) w celu uzyskania optymalnych parametrów wymiarowych. Uzyskanie dokładnych pozycji tensometrów przyklejonych do elastycznego korpusu, możliwe były dzięki zastosowaniu analizy rozkładu naprężeń metodą elementów skończonych (MES). Rodrigo Pérez Ubeda i in. [152] prezentują metodykę projektowania taniego czujnika momentów skręcających, autorzy wykazują, że stosując proste operacje obróbki skrawaniem są wystarczające do uzyskania bardzo zadowalającej dokładności pomiarowej do 2%, stosując metodę elementów skończonych do określania geometrii czujnika. W pracy prezentowane jest 6 przykładowych geometrii czujników momentu np. sześcianu, czteroprętowego łącznika, membranowego korpusu itd. Jednocześnie autorzy wskazują na fakt, że wykonanie czujników 6 osiowych to koszt powyżej 4000 euro [152]. Kolejnym przykładem odmiennej konstrukcji czujnika jest sensor zaprezentowany przez zespół Antona Royanto Ahmada. Czujnik o zakresie pomiarowym do 500N oraz 20Nm składa się z 32 tensometrów rozmieszczonych na elastycznym korpusie w kształcie krzyża [151]. Czujniki do zastosowań rolniczych to głównie konstrukcje służące do wyznaczania oporów występujących w czasie ciągnięcia zaczepionych do ciągnika maszyn w zakresie do około 20kN [155]. Ponadto, znane są rozwiązania do analizowania sił oporów agregatów poprzez specjalnie zaprojektowane stanowiska badawcze umieszczane pomiędzy TUZ ciągnika, a maszynami rolniczymi (rozdział 2.4.3). Urządzenie wyposażone w czujniki tensometryczne analizuje składowe obciążeń na poszczególnych cięgłach TUZ [156].

Analizując wymienione we wstępie źródła literaturowe oraz różne podejścia do rozwiązania problemu pomiarowego zdefiniowano lukę badawczą polegającą na możliwości uproszczenia geometrii czujnika i dostosowania jej do spodziewanych obciążeń występujących w czasie pielenia uwzględniając szczególne warunki pracy np. przeciążenie wynikające z wykonywanego zabiegu agrotechnicznego, kolizję z kamieniami i innymi elementami znajdującymi się w głębszych warstwach gleby.

4.2. Dane wejściowe oraz podstawy teoretyczne

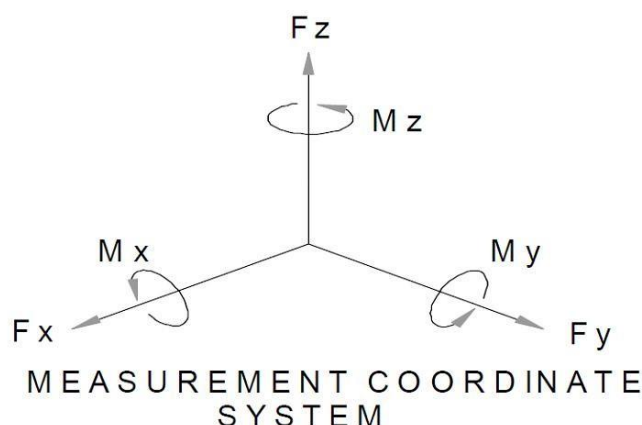
Projektowany w ramach realizowanego tematu 6 osiowy czujnik tensometryczny znajdzie zastosowanie na mechatronicznej sekcji pielącej. Na podstawie analizy danych literaturowych [96] oszacowano obciążenia występujące w czasie pielienia mechanicznego i zaprezentowano je na wykresie rys. 4.1.



Rys. 4.1. Szacunkowe opory pielienia mechanicznego w funkcji szerokości roboczej narzędzi

Szerokość projektowanego narzędzia pielącego wynosi 260mm, zatem maksymalny zakres dla siły oporu narzędzia to 500N według analizy literaturowej. Biorąc pod uwagę dynamikę działania urządzenia oraz możliwość natrafiania na nieoczekiwane przeszkody w glebie typu kamienie itp. jako zakres pomiarowy czujnika przyjęto 1000 N dla sił oraz 250 Nm dla momentów.

Konstrukcja czujnika według założeń miała umożliwiać pomiar sił oraz momentów skręcających w osiach X, Y i Z. Układ współrzędnych przyjęto w środku geometrycznym sensora, przy czym, oś Z jest jednocześnie osią symetrii płaszczyzny poprzecznej.



Rys. 4.2. Układ współrzędnych prototypowego 6 osiowego czujnika obciążeń

Do wykonania prototypów czujników użyto tensometrów foliowych o rezystancji 350Ω oraz długości czynnej ścieżek 5mm. Projektowany czujnik obciążeń działa na zasadzie pomiaru napięcia wyjściowego z ośmiu pełnych mostków tensometrycznych rozmieszczonych w miejscach koncentracji naprężeń wyznaczonych w analizach wytrzymałościowych metodą elementów skończonych. Dzięki zastosowaniu pełnych mostków pomiarowych czujnik jest mniej podatny na wpływ zmian temperatury na pomiary, które są dobrze kompensowane przez nie. Sygnał wyjściowy to składowa sygnałów z czterech aktywnych tensometrów, dzięki czemu uzyskuje się większą czułość układu co jest szczególnie ważne z uwagi na przyjęte współczynniki bezpieczeństwa konstrukcji co szerzej opisano w rozdziale 4.3. Czujniki wymagały przeprowadzenia czasochłonnej procedury kalibracji, gdzie rejestrowano odpowiedzi poszczególnych mostków tensometrycznych na każde z założonych obciążeń w celu wyznaczenia zależności pomiędzy nimi. Koniecznym było opracowanie stanowiska badawczego oraz metody umożliwiającej sprawdzenie każdego przypadku obciążania czujnika.

4.3. Budowa i zasada działania czujnika

Konstrukcja czujnika została zaprojektowana przy użyciu programu SolidWorks2022 wyposażonego w moduł Simulation do prowadzenia analiz metodą elementów skończonych. Na tej podstawie przeprowadzono serię analiz wytrzymałościowych czujnika, które posłużyły do zidentyfikowania położenia tensometrów oporowych w miejscach koncentracji naprężeń na powierzchni czujnika. Jego konstrukcja stanowi monoblok wykonany z pojedynczego kawałka nierdzewnej stali o właściwościach zaprezentowanych w *tabela 10* i *tabela 11*.

Tabela 10. Właściwości fizyczne stali M303HH [157]

Właściwości fizyczne stali M303HH	
Temperatura [°C]	20
Gęstość [kg/dm ³]	7,72
Przewodność cieplna [W/(m.K)]	22,8
Ciepło właściwe [J/(kg.K)]	460
Właściwy opór elektryczny [Ohm.mm ² /m]	0,6
Moduł sprężystości [10 ³ N/mm ²]	218

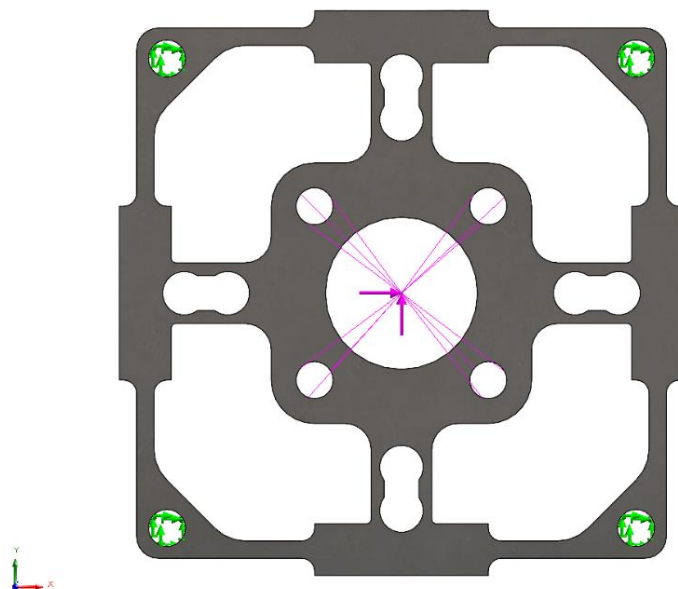
Tabela 11. Skład chemiczny stali M303HH [157]

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	N
0,27	0,3	0,65	14,5	1	0,85	+

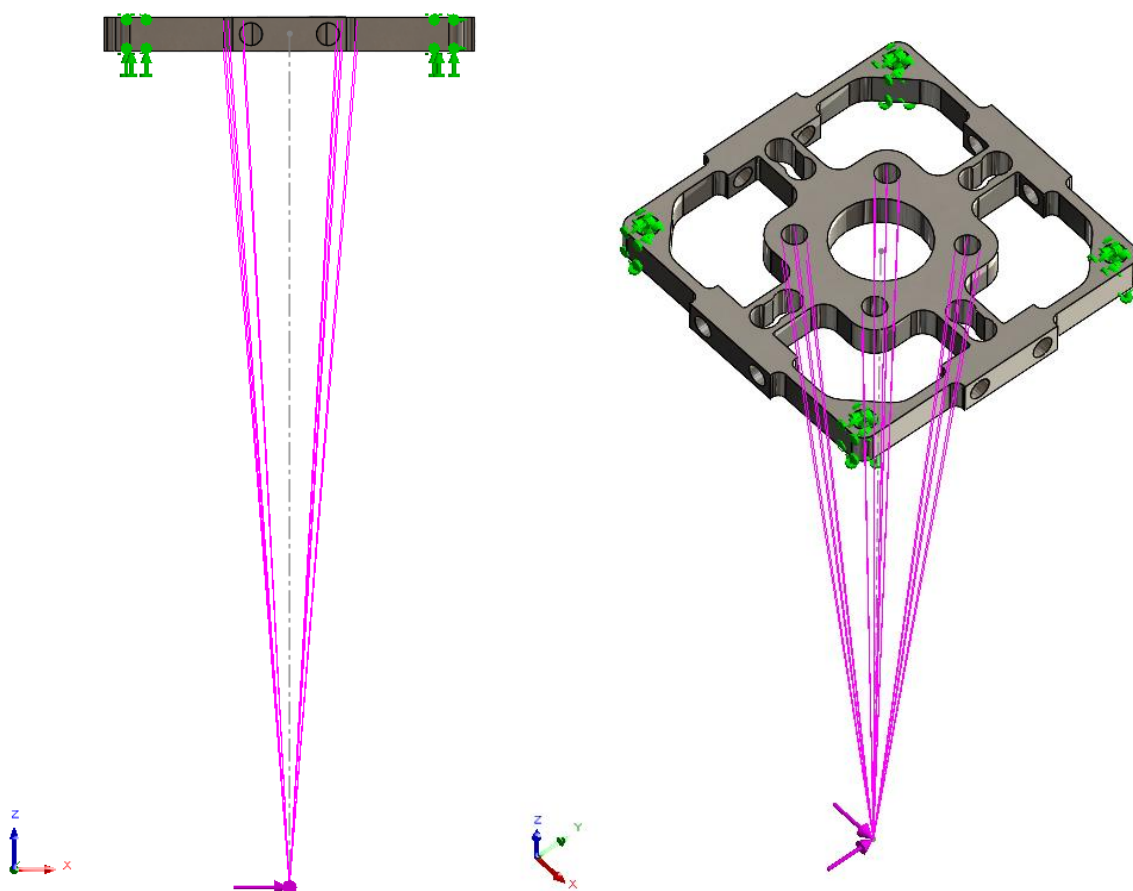
Poprzedziła to szczegółowa analiza materiałów konstrukcyjnych możliwych do zastosowania. Według analizy literatury oraz stanu techniki czujniki muszą być wykonywane z materiałów niekorodujących oraz poddanych odpowiedniemu procesowi hartowania w celu uzyskania wysokiej twardości powierzchni – ten aspekt ma wpływ na zmniejszenie histerezy czujnika [158]. Zdecydowano się zastosować stal M303HH (1.2316), która spełnia wspomniane wymagania (twardość 350-390HB) i cechuje się wysoką granicą plastyczności ok. 950MPa [159] co jest dodatkowym atutem – na każdym etapie projektowania brane są pod uwagę trudne warunki polowe charakteryzujące się dużą zmiennością i losowością (czujnik wytrzyma zderzenie narzędzia z kamieniem). Stal M303HH jest odporną na korozję, chromową stalą martenzytyczną o dobrej ciągliwości, wytrzymałości na korozję, odporności na ścieranie oraz polepszonych właściwościach kwalifikujących do obróbki wiórowej i polerowania [157]. Jako wyznacznik dla projektowanej konstrukcji przyjęto czujnik zaprezentowany przez Yongjun Sun i in. [153]. Przeprowadzono serię badań wytrzymałościowych metodą elementów skończonych, aż do uzyskania zadowalających wyników tzn. koncentracji naprężeń na powierzchni konstrukcji nieprzekraczających $0,75Re$ materiału dla przyjętych maksymalnych obciążeń tj. siły $F = 2000N$ zadanej na ramieniu 340mm (wartości wynikającej z przyjętej wstępnie kinematyki sekcji pielącej oraz mechatronicznego narzędzia). Wartość siły F wynika

z przyjętego współczynnika bezpieczeństwa wynoszącego $k=4$, który uwzględnia obciążenia dynamiczne wynikające z charakteru pracy narzędzi podłączonych do czujnika, kolizji z kamieniami itp. Siła maksymalna na narzędziu o szerokości 260mm wg źródeł literaturowych to około 500N (rys. 4.1).

Analizy statyczne konstrukcji czujnika były prowadzone metodą elementów skończonych w środowisku SolidWorks 2022 z nakładką Simulation według następujących warunków wejściowych. Obciążenia zewnętrzne były zadawane przy użyciu funkcji odległe obciążenie, które symulowało przekazywanie sił oporów ruchu projektowanego narzędzia mechatronicznego. Wspomniana funkcja zapewniła możliwość uwzględniania wielu przypadków obciążeń poprzez możliwość parametryzacji zadawanych sił i momentów w osiach X, Y i Z oraz ich lokalizacji względem środka geometrii konstrukcji – zaprezentowano na rys. 4.3 i rys. 4.4, kolorem różowym. Czujnik został zamocowany przy użyciu funkcji „nieruchoma geometria” w miejscach zaznaczonych kolorem zielonym na rys. 4.3 i rys. 4.4 – są to otwory montażowe, łączące narzędzie z zamontowanym sensorem w środkowej części z konstrukcją mechatronicznej sekcji pielącej w otworach umocowanych w narożach.



Rys. 4.3. Warunki wejściowe analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych – definicja obciążenia zewnętrznego.

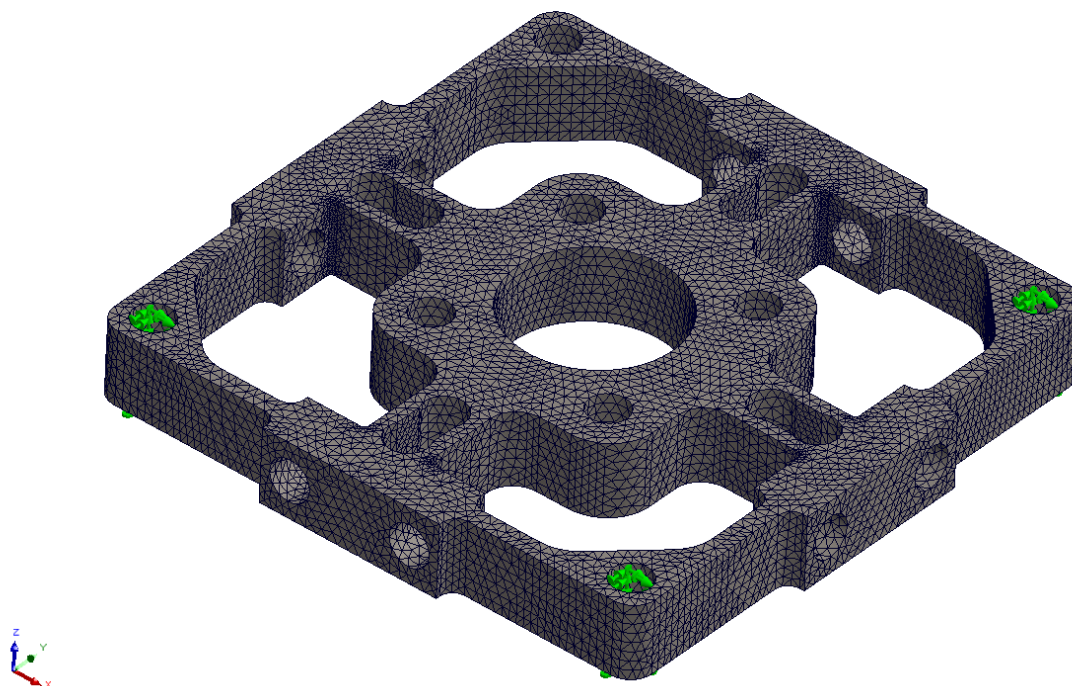


Rys. 4.4. Warunki wejściowe analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych – definicja obciążenia zewnętrznego.

Siatka elementów skończonych była generowana automatycznie przez program według ustawionej maksymalnej drobnoziarnistości. Maksymalna wielkość pojedynczego elementu skończonego wynosiła 2mm, minimalna 0,4mm. Proporcja przyrostu rozmiaru elementu wynosiła 1,4. Parametryzacja właściwości siatki zapewniła wysokiej jakości siatkę zagęszczoną w krzywiznach. Siatka była pozbawiona defektów co stwierdzono przy użyciu funkcji diagnostyki zawartej w programie, a jako kryterium oceny przyjęto jakobian. *Jakobian* mierzy odchylenie kształtu elementu od kształtu idealnego (tego, który ma proste krawędzie o jednakowych długościach). *Jakobian* idealnego elementu czworobocznego drugiego rzędu z krawędziami liniowymi wynosi 1,0. *Jakobian* elementu zwiększa się wraz ze wzrostem krzywizny krawędzi elementu, aby zmapować zakrzywioną geometrię. Zniekształcone elementy

mają ujemny jacobian i dają niedokładne wyniki [160]. Wykres siatki elementów skończonych po dyskretyzacji modelu CAD czujnika zaprezentowano na rys. 4.5.

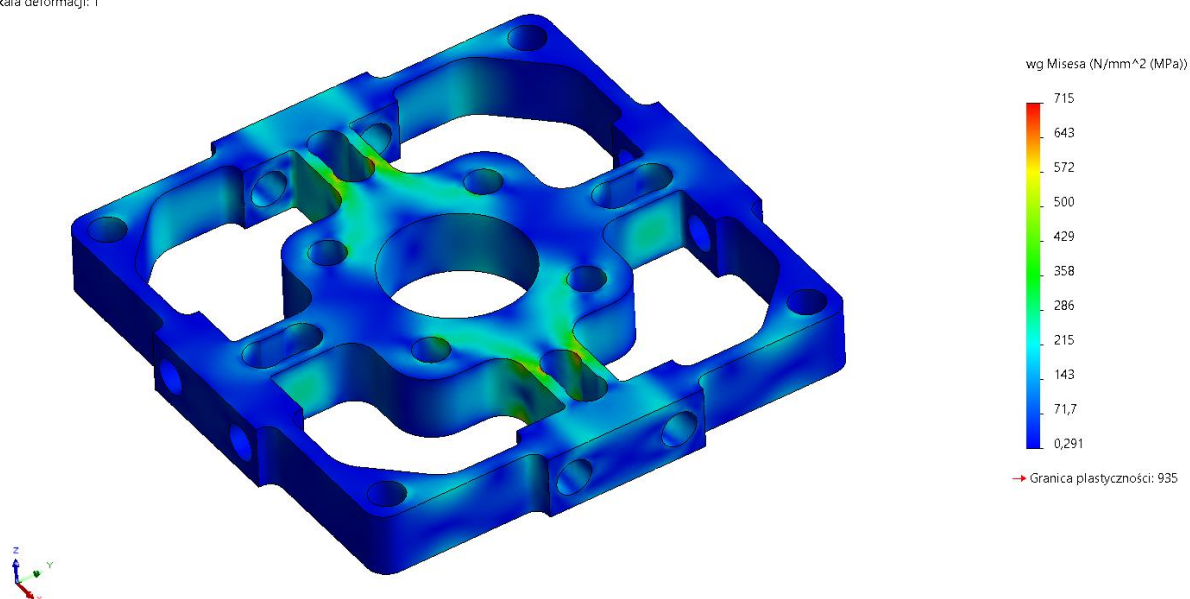
Nazwa modelu: 00-00-01-v3
Nazwa badania: Analiza statyczna 1(-Domyślna-)
Typ wykresu : Siatka Jakość1



Rys. 4.5. Wykres jakości siatki wygenerowanej na potrzeby analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych w programie SolidWorks 2022.

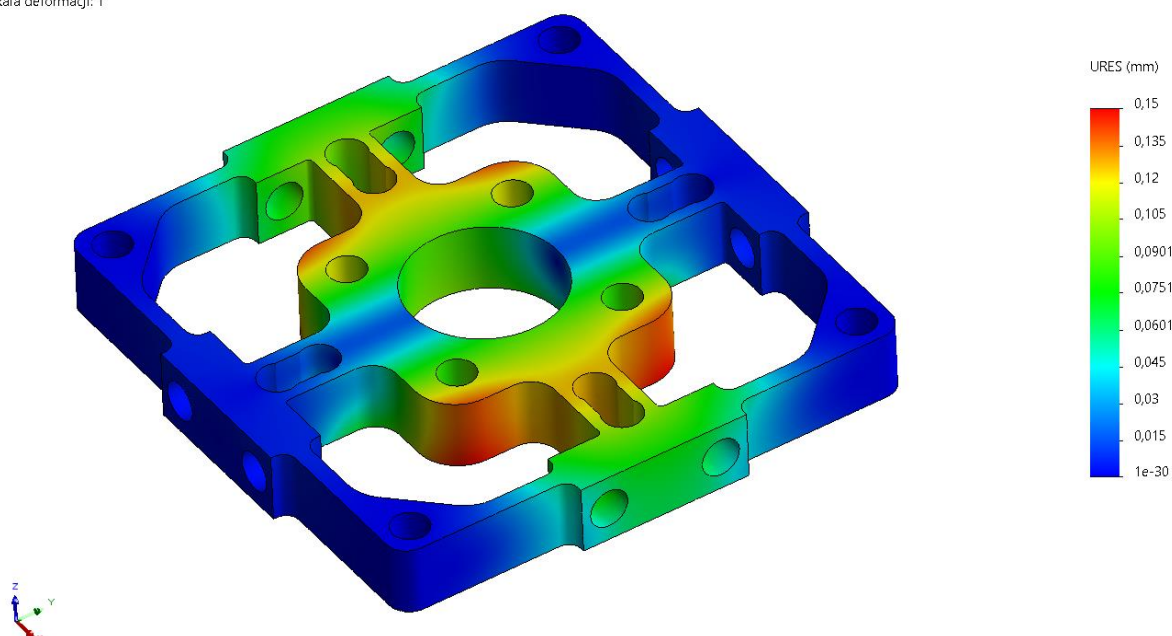
Prezentowana w podrozdziale konstrukcja wieloosiowego czujnika obciążeń jest efektem prowadzonych analiz wytrzymałościowych według opisanych w niniejszym rozdziale warunków wejściowych. Badane przypadki obciążeń podsumowano w formie tabeli, gdzie podsumowano maksymalne naprężenia konstrukcji oraz założenia dla wytrzymałości czujnika (tabela 12). Spełnienie założonych dla konstrukcji wymagań wytrzymałościowych pozwoliło przystąpić do kolejnych analiz mających na celu wytypowanie punktów pomiarowych dla tensometrów oporowych. Konstrukcja była modyfikowana pod kątem znalezienia kompromisu pomiędzy wytrzymałością na obciążenia krytyczne, a powstaniem lokalnych koncentracji naprężeń na potrzeby odczytu obciążeń przy użyciu układu pomiarowego z naklejonymi na czujnik tensometrami oporowymi.

Nazwa modelu: 00-00-01-v3
 Nazwa badania: Analiza statyczna 1(-Domyślna-)
 Typ wykresu: Analiza statyczna naprężenie węzłowe Naprężenie1
 Skala deformacji: 1



Rys. 4.6. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.

Nazwa modelu: 00-00-01-v3
 Nazwa badania: Analiza statyczna 1(-Domyślna-)
 Typ wykresu: Statyczne przemieszczenie Przemieszczenie1
 Skala deformacji: 1

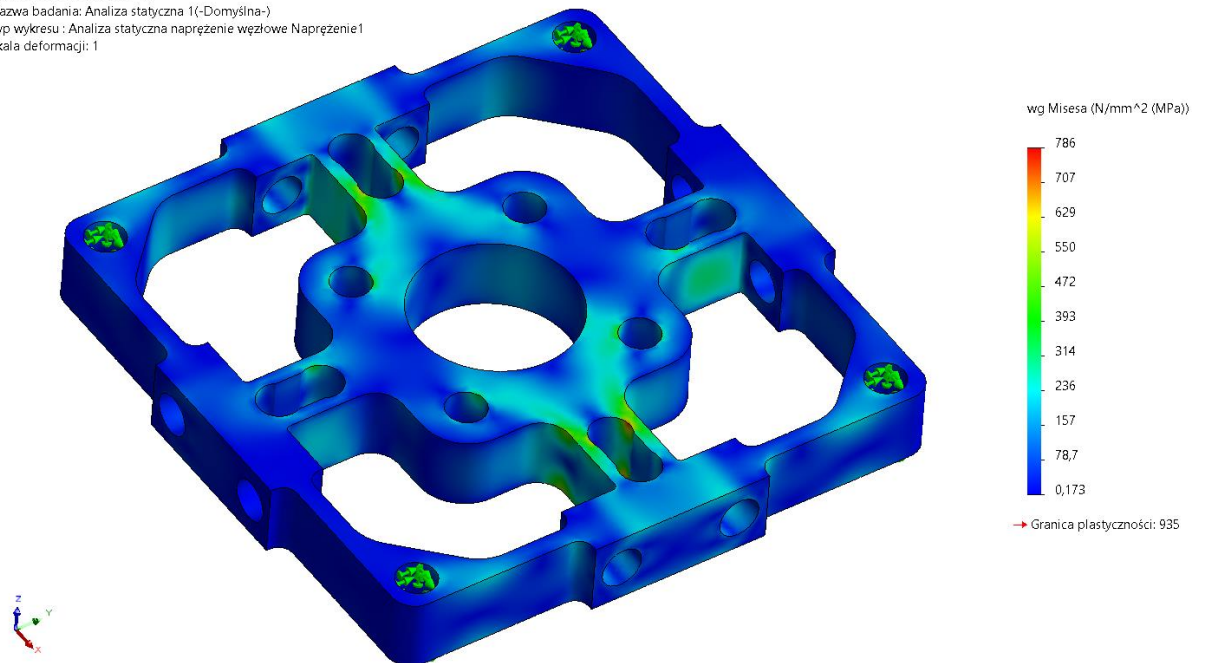


Rys. 4.7. Mapa przemieszczeń dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.

Tabela 12. Zestawienie przypadków badanych obciążeń konstrukcji czujnika w analizach wytrzymałościowych metodą elementów skończonych

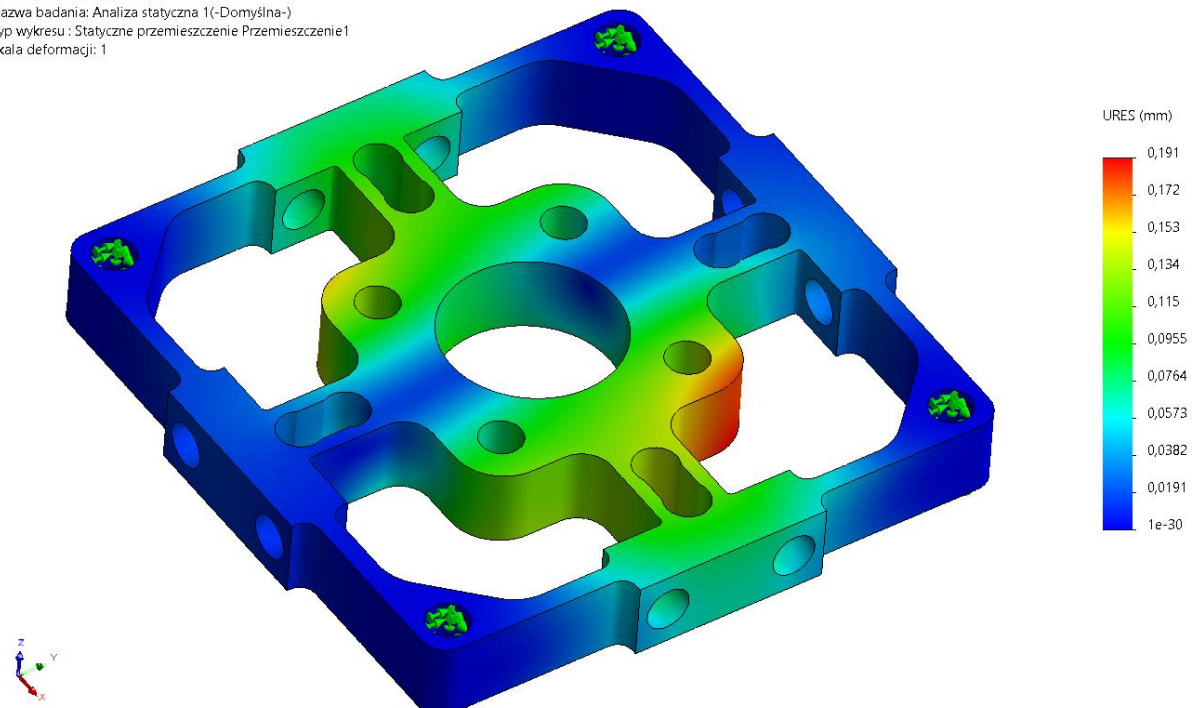
Lp.	Definicja obciążenia zewnętrznego	Badany przypadek pracy	Wytężenie materiału $\sigma_{vonMises}$ [MPa]
1	$F_x = 2000\text{N}$ odległe obciążenie na 340mm	Praca urządzenia z narzędziem o szer. 260mm przy maksymalnym obciążeniu oraz kolizja z kamieniem	715
2	$F_x = 2000\text{N}$ $F_y = 500\text{N}$ odległe obciążenie na 340mm	Praca urządzenia z narzędziem o szer. 260mm oraz kolizja z kamieniem. Uwzględnienie siły bocznej działającej na narzędzie.	759
3	$F_x = 2000\text{N}$ $F_y = 500\text{N}$ $F_z = 350\text{N}$ odległe obciążenie na 340mm	Praca urządzenia z narzędziem o szer. 260mm przy maksymalnym obciążeniu oraz kolizja z kamieniem. Uwzględnienie siły bocznej działającej na narzędzie oraz przenoszenia 1/3 ciężaru całej sekcji pielącej (ciężar maszyny rozłożony na 3 zamontowane narzędzia)	769
4	$F_x = 2000\text{N}$ $F_y = 500\text{N}$ $F_z = 950\text{N}$ odległe obciążenie na 340mm	Praca urządzenia z narzędziem o szer. 260mm przy maksymalnym obciążeniu oraz kolizja z kamieniem. Uwzględnienie siły bocznej działającej na narzędzie oraz przenoszenie ciężaru całej sekcji pielącej.	786

Nazwa modelu: 00-00-01-v3
 Nazwa badania: Analiza statyczna 1(-Domyślna-)
 Typ wykresu: Analiza statyczna naprężenie węzłowe Naprężenie1
 Skala deformacji: 1



Rys. 4.8. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$, $F_y = 500\text{N}$, $F_z = 950\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.

Nazwa modelu: 00-00-01-v3
 Nazwa badania: Analiza statyczna 1(-Domyślna-)
 Typ wykresu: Statyczne przemieszczenie Przemieszczenie1
 Skala deformacji: 1

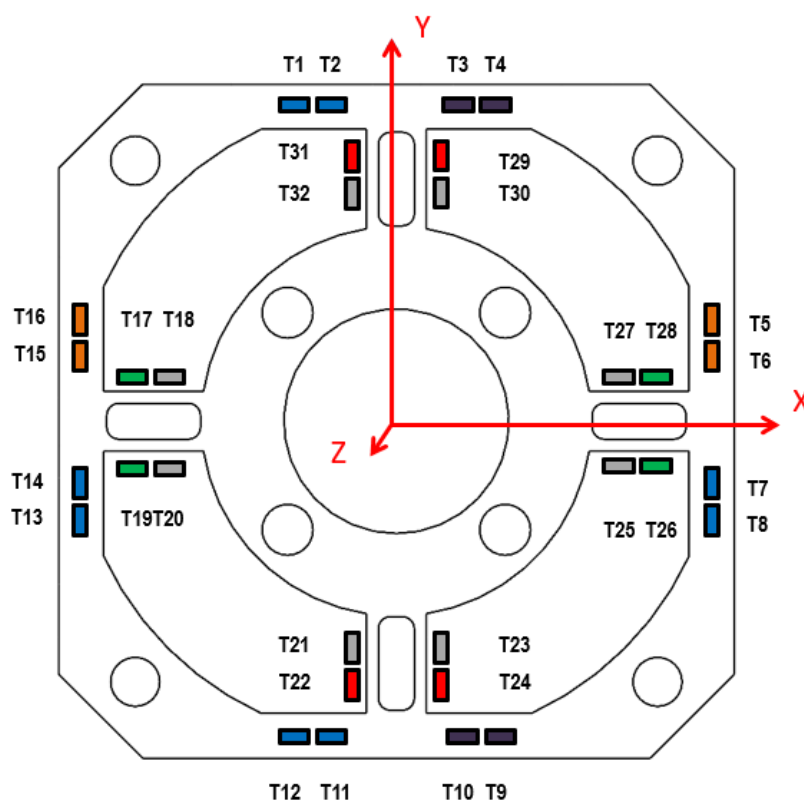


Rys. 4.9. Mapa przemieszczeń dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$, $F_y = 500\text{N}$, $F_z = 950\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.

Czujnik działa w oparciu o pomiar odpowiedzi mostków tensometrycznych na zadawane obciążenia. Część środkowa czujnika posiadająca cztery otwory przystosowane do montażu różnego typu narzędzi - jest elementem czynnym czujnika. Cztery skrajne otwory służą do nieruchomego zamocowania konstrukcji do dedykowanego uchwytu. Na podstawie prowadzonych analiz wytrzymałościowych metodą elementów skończonych oraz na podstawie analiz literatury [151–153] zaproponowano układ pomiarowy czujnika składający się z 32 tensometrów rozmieszczonych na powierzchni czujnika jak na rys. 4.10. Charakterystyczną właściwością czujników wieloosiowych jest fakt, że poszczególne mostki tensometryczne zakłócają się nawzajem. Obciążenia mierzone przez czujnik $X=(F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)$ to składowa wszystkich mierzonych sygnałów z ośmiu mostków tensometrycznych $B=(B_{Fx}, B_{Fy}, B_{Fz1}, B_{Fz2}, B_{Mx}, B_{My}, B_{Mz1}, B_{Mz2})$. Koniecznym było przeprowadzenie procedury kalibracyjnej czujnik w celu znalezienia macierzy K współczynników kalibrujących układ pomiarowy.

$$X = K^{-1} \cdot B$$

4.1



Rys. 4.10. Zaproponowany układ pomiarowy wieloosiowego czujnika obciążeń składający się z 32 aktywnych tensometrów

Tensometry rozmieszczone na powierzchni stalowego bloku czujnika zostały podzielone w następujące grupy umożliwiające identyfikowanie założonych obciążeń (równanie 4.2).

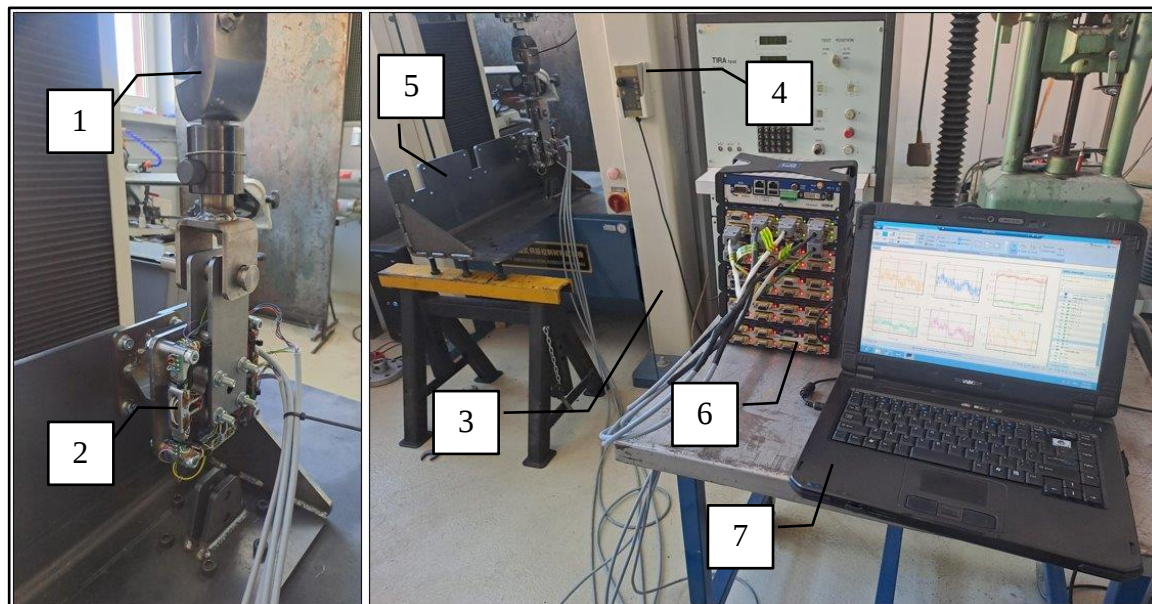
$$\begin{aligned}
 B_{F_x} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{24} - \varepsilon_{29} + \varepsilon_{31}) \\
 B_{F_y} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{19} - \varepsilon_{17} - \varepsilon_{28} + \varepsilon_{26}) \\
 B_{F_{z1}} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \varepsilon_{12} + \varepsilon_{11}) \\
 B_{F_{z2}} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_7 - \varepsilon_8 - \varepsilon_{14} + \varepsilon_{13}) \\
 B_{M_x} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_4 - \varepsilon_3 - \varepsilon_{10} + \varepsilon_9) \\
 B_{M_y} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_5 - \varepsilon_6 - \varepsilon_{15} + \varepsilon_{16}) \\
 B_{M_{z1}} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{23} - \varepsilon_{21} - \varepsilon_{30} + \varepsilon_{32}) \\
 B_{M_{z2}} &= \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_{20} - \varepsilon_{18} - \varepsilon_{25} + \varepsilon_{27})
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

4.4. Metoda badawcza - kalibracja czujników

Zaprojektowane i wykonane w ramach realizacji tematu prototypy czujników zostały przebadane dwuetapowo na specjalnie zaprojektowanych stanowiskach badawczych, których konstrukcja zapewniła możliwość zadawania obciążeń w każdym z zakładanych kierunków.

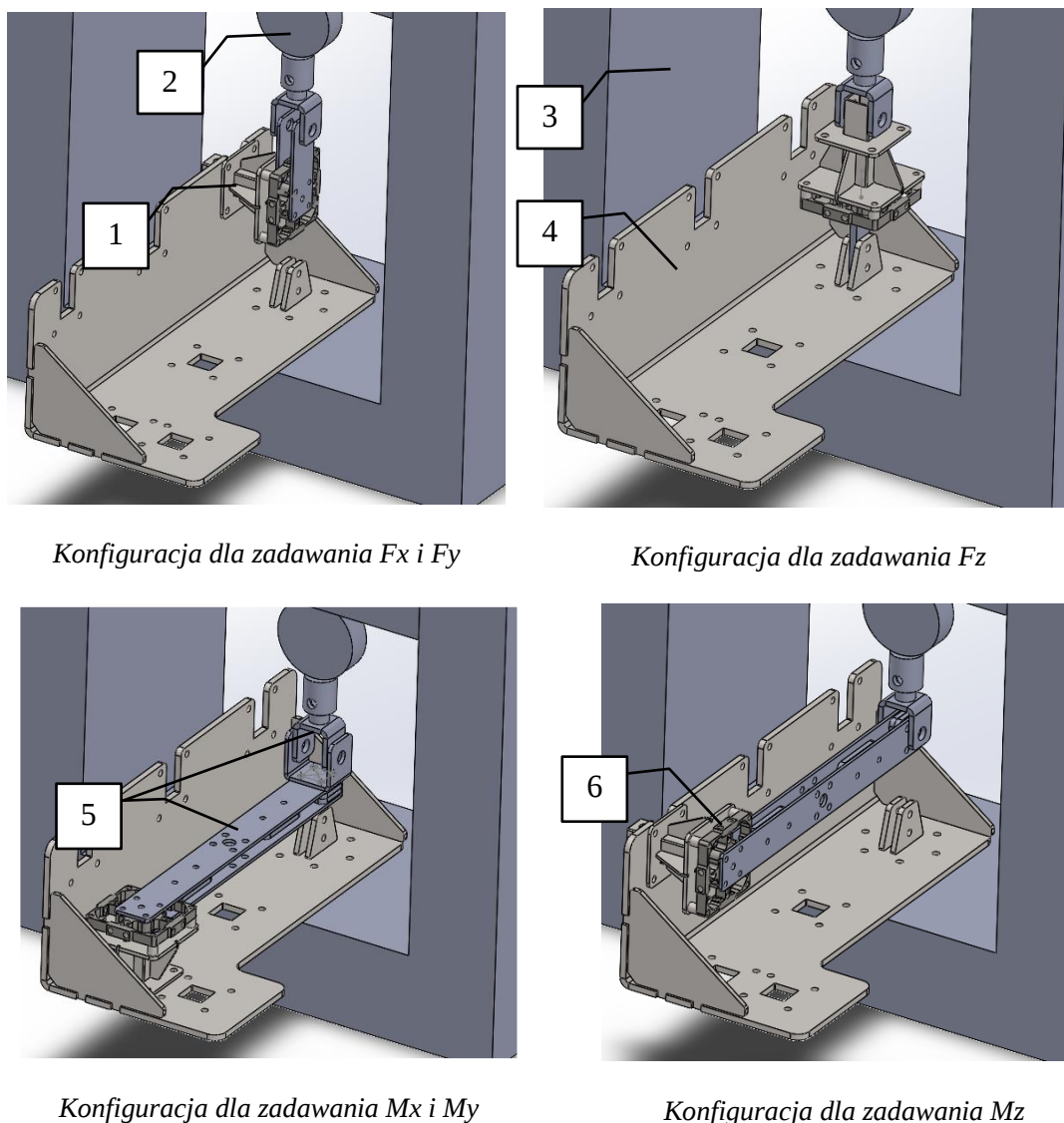
W pierwszej kolejności badania przeprowadzono na stanowisku do weryfikacji działania i wstępnej kalibracji prototypów czujników (rys. 4.11). Głównym elementem stanowiska była maszyna wytrzymałościowa HT-2402 wyposażona w czujnik siły UTILCELL 650 o zakresie pomiarowym do 5t. Prototypy czujnika montowane na konfigurowalnym uchwycie umożliwiającym zadawanie obciążeń referencyjnych były obciążane w zakresie +/-2000N w przypadku sił oraz +/-250Nm dla momentów skręcających. Pierwszy etap badań miał na celu sprawdzenie poprawności działania prototypów czujników we wstępnie zawyżonym zakresie pomiarowym. Ponadto w skład stanowiska pomiarowego wchodziła aparatura rejestrująca QuantumX CX22B-W jako urządzenie do rejestracji sygnałów w jednej podstawie czasowej oraz do akwizycji danych, dzięki czemu możliwe było szybkie dokonanie wstępnej oceny prawidłowości działania czujników oraz wprowadzanie ewentualnych zmian w prototypach.

Wspomniana aparatura była połączona z komputerem, który służył do obsługi aparatury rejestrującej dane z częstotliwością 50Hz oraz do wizualizacji danych.



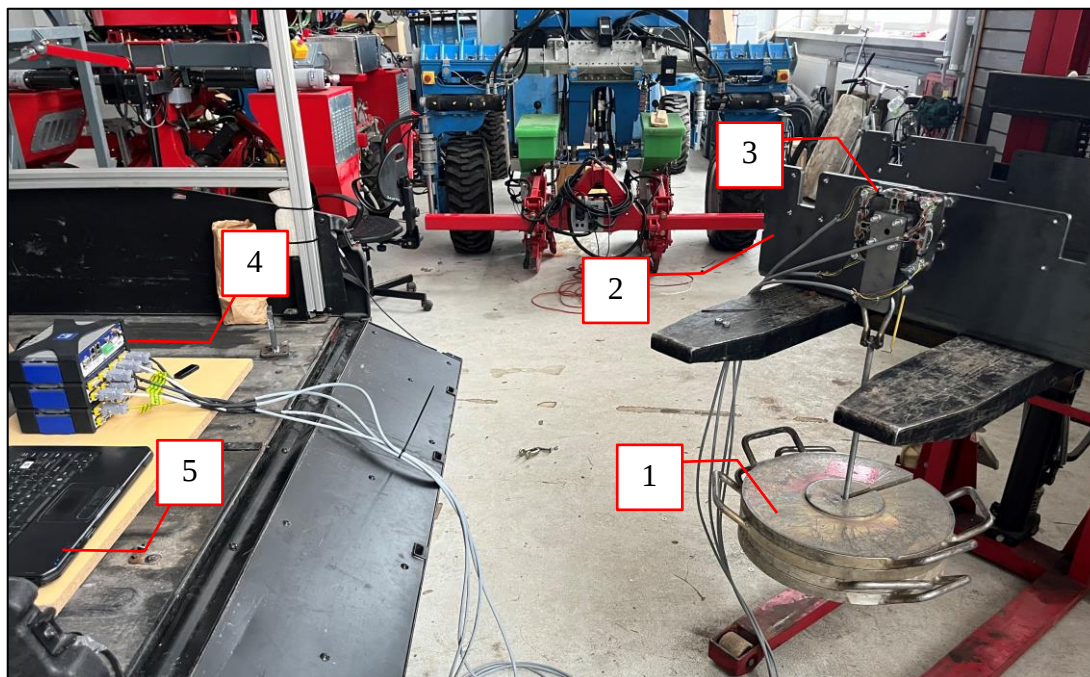
Rys. 4.11. Stanowisko badawcze do weryfikacji działania i wstępnej kalibracji prototypów czujników, gdzie: 1 - czujnik referencyjny UTILCELL 650; 2 – prototyp czujnika; 3 – maszyna wytrzymałościowa HT-2402; 4 – pulpit do manualnej obsługi maszyny wytrzymałościowej; 5 – konfigurowalny uchwyt do zadawania obciążeń referencyjnych dla prototypowego czujnika; 6 – aparatura pomiarowa QuantumX CX22B-W; 7 – komputer do parametryzacji aparatury pomiarowej i wizualizacji danych.

Dla każdego prototypu czujnika rejestrowano sygnały z 8 mostków pomiarowych oraz sygnał z czujnika referencyjnego, który pełnił funkcję kalibracyjną oraz bezpieczeństwa przed przeciążeniem konstrukcji. Obciążenie było wymuszane na czujnik osadzony na specjalnie zaprojektowanym do tego celu konfigurowalnym uchwycie poprzez maszynę wytrzymałościową (rys. 4.12). Jej obsługa odbywała się w trybie manualnym z dedykowanego pulpitu umożliwiającego manualną regulację. Stanowisko posiada cztery główne konfiguracje zadawania siły poprzez czujnik weryfikujący obciążenie. Odpowiednie zamontowanie uchwytu badanego czujnika oraz zastosowanie elementów pośredniczących przekazywaniu obciążenia, umożliwiało zadanie obciążeń w wybranym kierunku, czego efektem jest skręcanie, ściskanie lub rozciąganie konstrukcji czujnika.



Rys. 4.12. Konfigurowalny uchwyt do zadawania obciążeń referencyjnych dla prototypowego czujnika sześćoosiowego, gdzie: 1 – uchwyt badanego czujnika; 2 – czujnik referencyjny; 3 – maszyna wytrzymałościowa; 4 – konfigurowalny uchwyt czujnika; 5 – elementy przekazujące obciążenie; 6 – prototypowy czujnik.

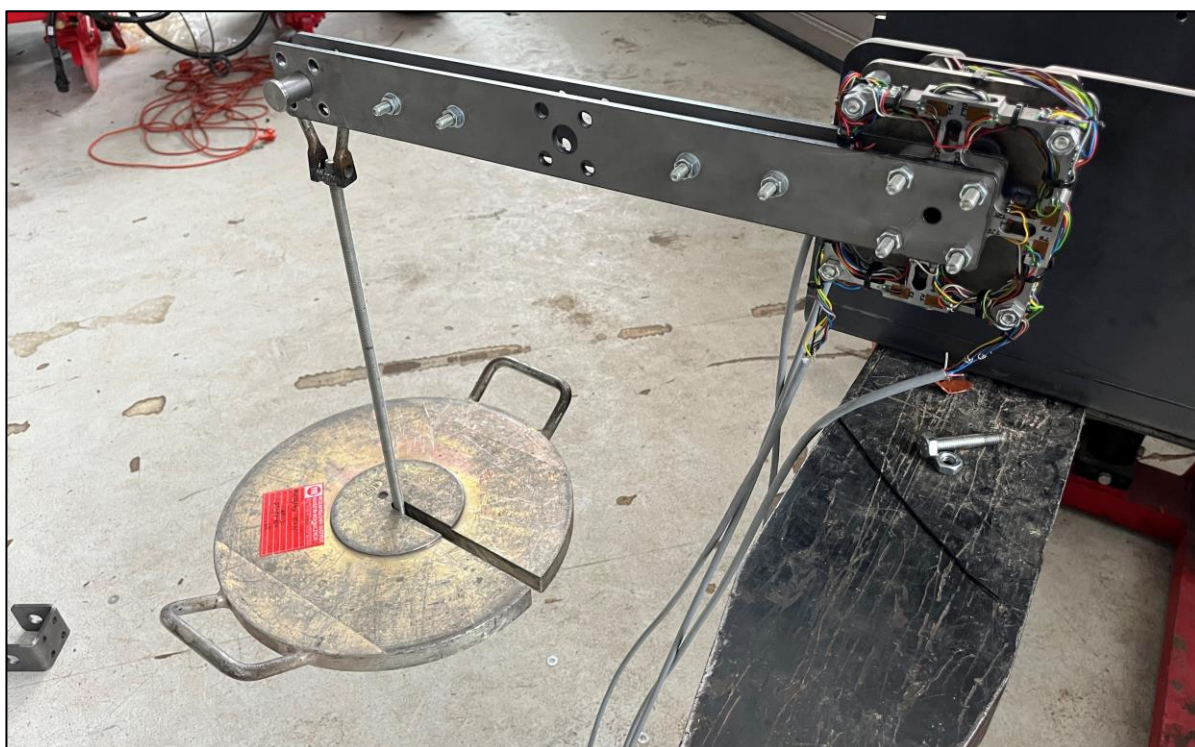
Pierwszy etap badań miał na celu weryfikację poprawności naklejenia tensometrów oraz zarejestrowanie odpowiedzi mostków tensometrycznych dla obciążeń skrajnych, zakładanych na etapie projektowania – analizowanych metodą elementów skończonych. Potwierdzenie założeń konstrukcyjnych oraz poprawności wykonania układu pomiarowego pozwoliło przystąpić do drugiego etapu kalibracji, który był przeprowadzany na stanowisku badawczym do kalibracji prototypowych czujników metodą macierzy odwrotnej (rys. 4.13 i rys. 4.14).



Rys. 4.13. Stanowisko badawcze do kalibracji prototypowych czujników metodą macierzy odwrotnej, konfiguracja dla sił F_x i F_y , gdzie: 1 – obciążenie referencyjne; 2 - konfigurowalny uchwyt do zadawania obciążeń referencyjnych dla prototypowego czujnika; 3 – prototyp czujnika; 4 – aparatura pomiarowa QuantumX CX22B-W; 5 – komputer do parametryzacji aparatury pomiarowej i wizualizacji danych.

Drugi etap badań był prowadzony na stanowisku składającym się z tych samych konfigurowalnych i pośredniczących elementów do zadawania obciążeń. Czujnik zamontowany nieruchomo na uchwycie, obciążany był przy użyciu obciążników skalibrowanych jako odpowiedniki 250N każdy. Dzięki podłużnemu nacięciu możliwe było w czasie pomiarów dodawanie kolejnych obciążników, aż do uzyskania zakładanej siły kalibrującej czujnik. Aparatura pomiarowa QuantumX CX22B-W rejestrowała odpowiedzi ośmiu pełnych mostków czujnika. Po przyłożeniu każdego ciężaru czekano, aż do ustabilizowania się odczytów i rejestrowano co najmniej 8 sekund stabilnego sygnału co odpowiada co najmniej 400 próbkom sygnału. Zebrane dane w następnej kolejności posłużyły do wyznaczenia czułości czujników oraz do wyznaczenia macierzy odwrotności. Dzięki temu możliwe było wyznaczanie sił i momentów skręcających poprzez wyznaczenie odpowiednich współczynników K . Analogicznie jak w pierwszym etapie kalibracji stanowisko było przezbierane dla każdego przypadku.

Wprowadzenie drugiego etapu kalibracji było konieczne z uwagi na trudności z uzyskiwaniem luzu między elementami przekazującymi obciążenie na czujnik a maszyną wytrzymałościową wymuszającą siłę – maszyna wytrzymałościowa sterowana manualnie oraz niedokładności wykonania uchwytów utrudniały uzyskanie sytuacji braku obciążenia, będącego punktem referencyjnym dla prowadzonych badań. Zastosowanie obciążników rozwiązało ten problem oraz zmniejszyło do minimum wpływ elementów pośredniczących na pomiary w czasie zdemontowania wzorców obciążenia.



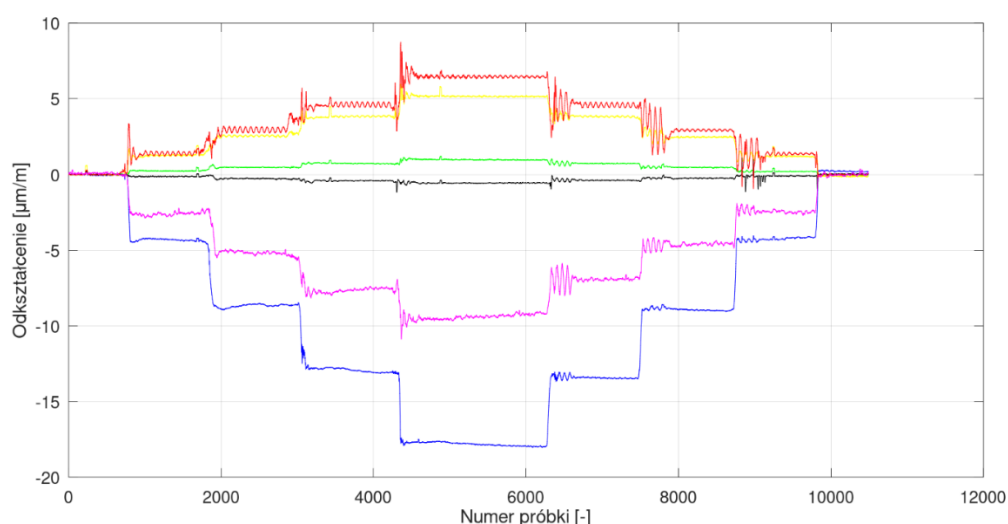
Rys. 4.14. Stanowisko badawcze do kalibracji prototypowych czujników metodą macierzy odwrotnej, konfiguracja dla momentów M_x i M_y .

4.5. Kalibracja metodą macierzy odwrotnej

Cechą charakterystyczną czujników wieloosiowych jest fakt, że poszczególne obciążenia mają wpływ na każdy z kanałów pomiarowych np. obciążenie F_x jest odczytywane w pewnym stopniu przez każdy z mostków pomiarowych. W celu uzyskiwania wiarygodnych wyników konieczne jest przeprowadzenie procedury kalibracyjnej, która pozwoli precyzyjnie określić wpływ poszczególnych obciążeń na mierzone wartości. W tym celu przeprowadzono serię badań na stanowisku badawczym dla każdego przypadku obciążeniowego. Przykładano znane wzorce obciążenia i rejestrowano odpowiedzi wszystkich kanałów (rys. 4.15) w celu wyznaczenia macierzy odwrotnej współczynników transformacji oraz wyznaczeniu układu równań:

$$\begin{aligned}
 B_{Fx} &= K1 \cdot F_x \\
 B_{Fy} &= K7 \cdot F_x \\
 B_{Fz} &= K13 \cdot F_x \\
 B_{Mx} &= K19 \cdot F_x \\
 B_{My} &= K25 \cdot F_x \\
 B_{Mz} &= K31 \cdot F_x
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

,gdzie: B_{Fx} , B_{Fy} , itd. – odpowiedź mostka pomiarowego; $K1$, $K7$, itd. – współczynniki funkcji transferu; F_x – zadane obciążenie zewnętrzne.



Rys. 4.15. Przykładowy przebieg sygnałów z poszczególnych mostków tensometrycznych czujnika

Ta sama procedura została wykorzystana do kalibracji pozostałych pięciu osi czujnika, w celu wyznaczenia pozostałych funkcji transferu. Korzystając z teorii superpozycji, można je połączyć, aby uzyskać równania wyjściowe, które w pełni opisują wyjście czujnika dla wszystkich zastosowanych obciążeń.

$$B_{Fx} = K1 \cdot F_x + K2 \cdot F_y + K3 \cdot F_z + K4 \cdot M_x + K5 \cdot M_y + K6 \cdot M_z \quad 4.4$$

W celu określania składowych obciążeń w czasie rzeczywistym kolejnym krokiem było zebranie danych dla wszystkich przypadków obciążenia i wyznaczenie na tej podstawie macierzy odwrotnej, która uwzględnia wpływ poszczególnych tensometrów na każdą składową obliczanych sił.

Tabela 13. Odpowiedzi mostków pierwszego czujnika na obciążenia zewnętrzne

		Obciążenia zewnętrzne					
		Fx (1000N)	Fy (1000N)	Fz (1000N)	Mx (250Nm)	My (250Nm)	Mz (250Nm)
OUTPUTS (µm/m)	Fx	-17,886	-5,2286	-3,9896	28,175	-19,822	65,114
	Fy	0,98789	-22,565	1,7314	30,568	3,697	1,3103
	Fz	5,1081	2,1258	-119,76	30,678	-17,806	-1,3593
	Mx	-0,55555	-5,0076	2,8286	470,02	-1,9102	-14,848
	My	6,4374	-0,3349	-3,7039	-7,2502	461,38	-6,5635
	Mz	-9,3396	6,5129	-5,5195	17,51	-26,932	-233,28

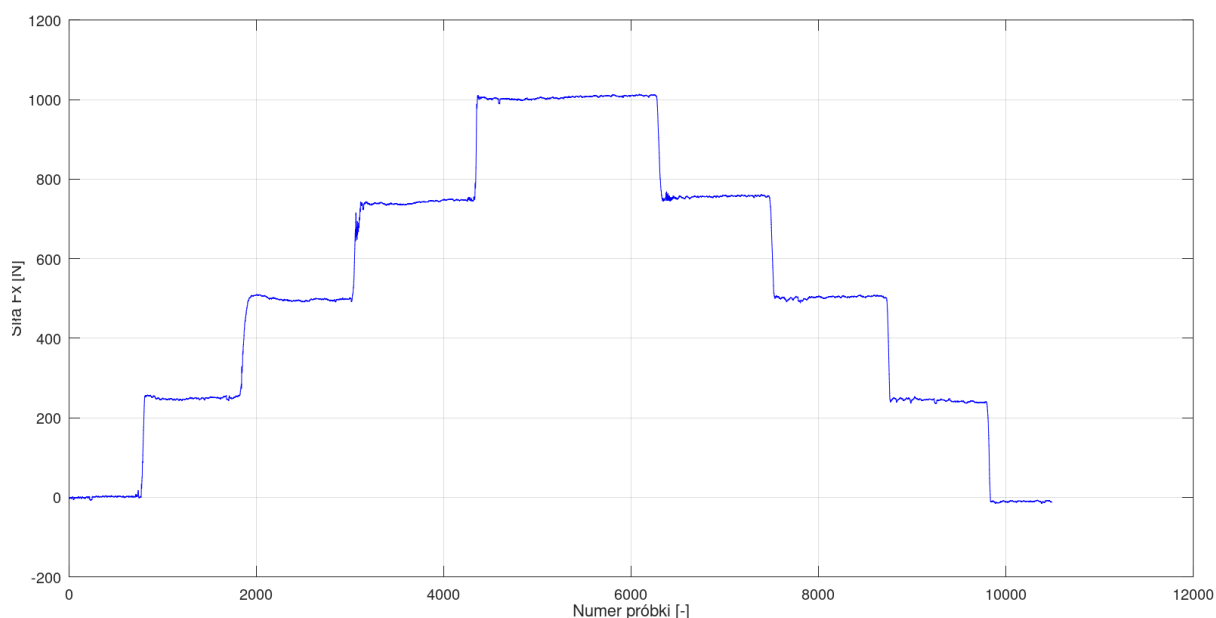
Ostateczną postać macierzy odwrotnej dla czujnika przedstawia równanie 4.5.

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} -48,7687 & 7,0148 & 2,5100 & 2,7693 & -2,8419 & -13,6840 \\ -2,0923 & -44,8692 & -0,4639 & 3,1156 & 0,2041 & -1,0374 \\ -2,2419 & -0,5873 & -8,2247 & 0,7255 & -0,4419 & -0,6149 \\ -0,0012 & -0,1289 & 0,0125 & 0,5409 & 0,0016 & -0,0356 \\ 0,1719 & -0,0413 & -0,0248 & 0,0013 & 0,5505 & 0,0323 \\ 0,4669 & -0,3848 & 0,0241 & 0,0302 & -0,0310 & -0,9447 \end{bmatrix} \quad 4.5$$

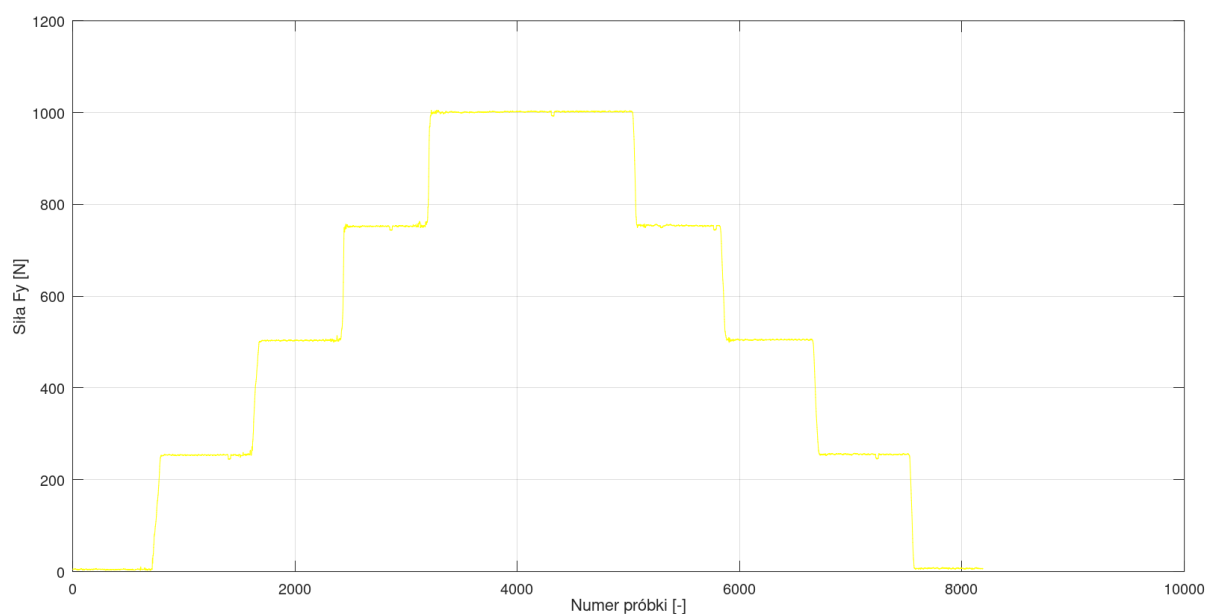
Wartości obciążeń dla poszczególnych osi wyznaczane są według zależności 4.6. Wartości współczynników konfiguracyjnych są przypisane do konkretnego modelu czujnika. Obydwa czujniki zostały skalibrowane wg opisanej procedury, dzięki temu udało się uniknąć błędów związanych z wpływem precyzji naklejania tensometrów na elementy konstrukcji.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -48,7687 & 7,0148 & 2,5100 & 2,7693 & -2,8419 & -13,6840 \\ -2,0923 & -44,8692 & -0,4639 & 3,1156 & 0,2041 & -1,0374 \\ -2,2419 & -0,5873 & -8,2247 & 0,7255 & -0,4419 & -0,6149 \\ -0,0012 & -0,1289 & 0,0125 & 0,5409 & 0,0016 & -0,0356 \\ 0,1719 & -0,0413 & -0,0248 & 0,0013 & 0,5505 & 0,0323 \\ 0,4669 & -0,3848 & 0,0241 & 0,0302 & -0,0310 & -0,9447 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_{Fx} \\ B_{Fy} \\ B_{Fz} \\ B_{Mx} \\ B_{My} \\ B_{Mz} \end{bmatrix} \quad 4.6$$

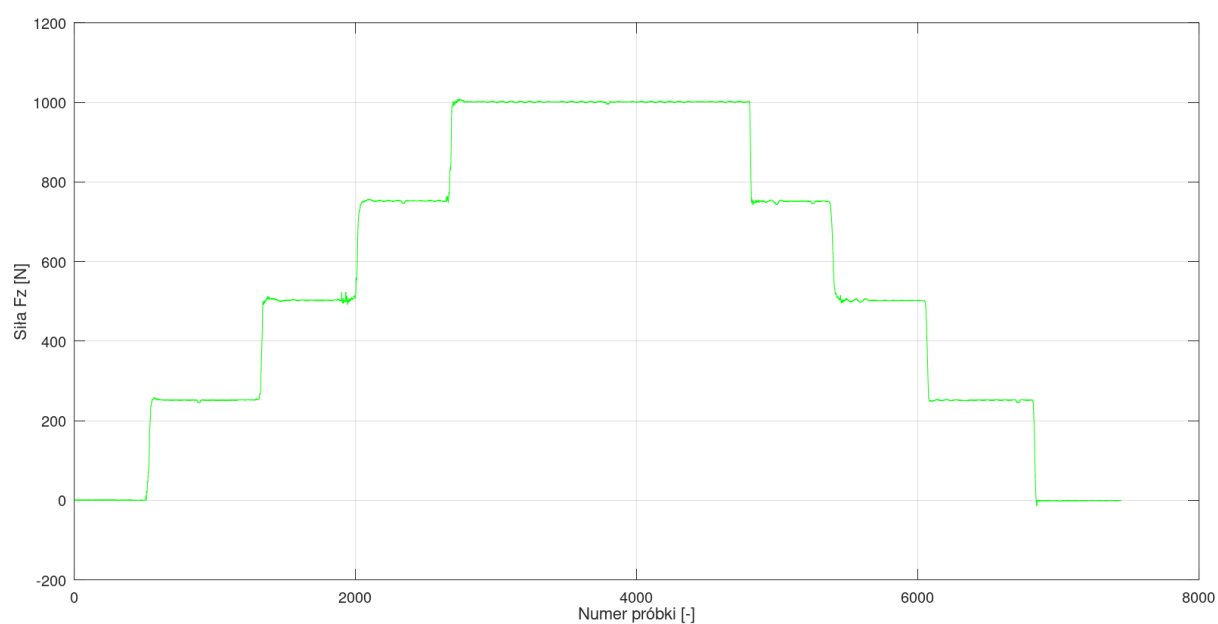
Wyniki badań były analizowane oraz wizualizowane przy użyciu programu Octave. W dalszej części rozdziału zaprezentowano przykładowe przebiegi zarejestrowanych sił (rys. 4.16, rys. 4.17, rys. 4.18) i momentów (rys. 4.19, rys. 4.20, rys. 4.21) po obliczeniu ich wartości końcowych.



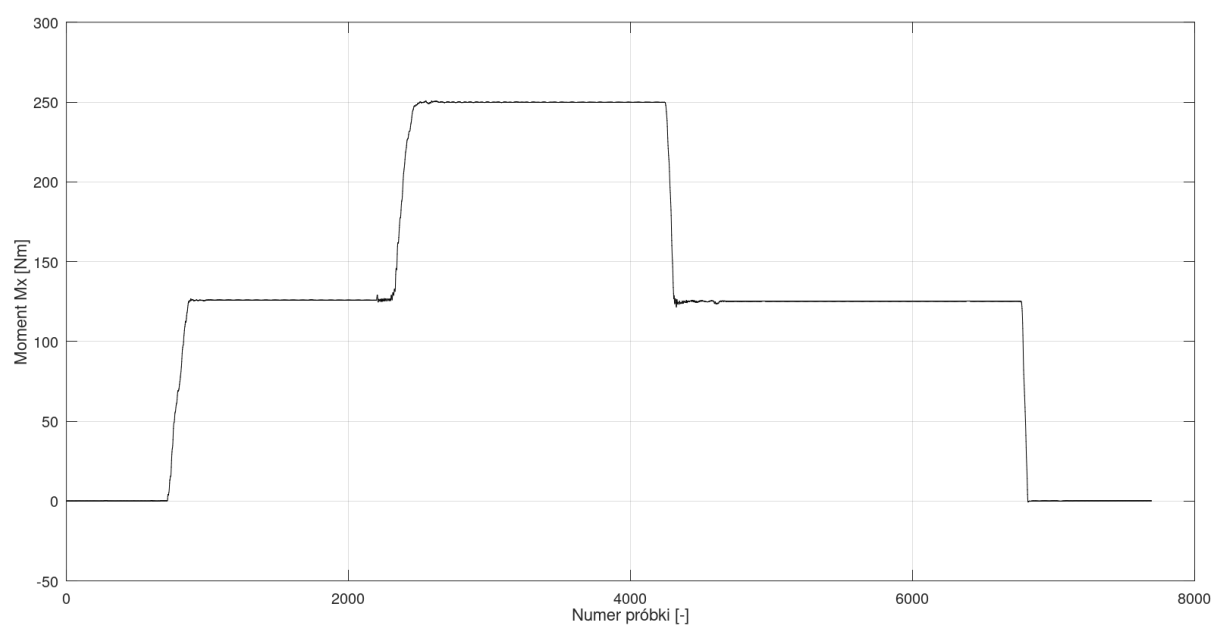
Rys. 4.16. Wartości siły F_x na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji



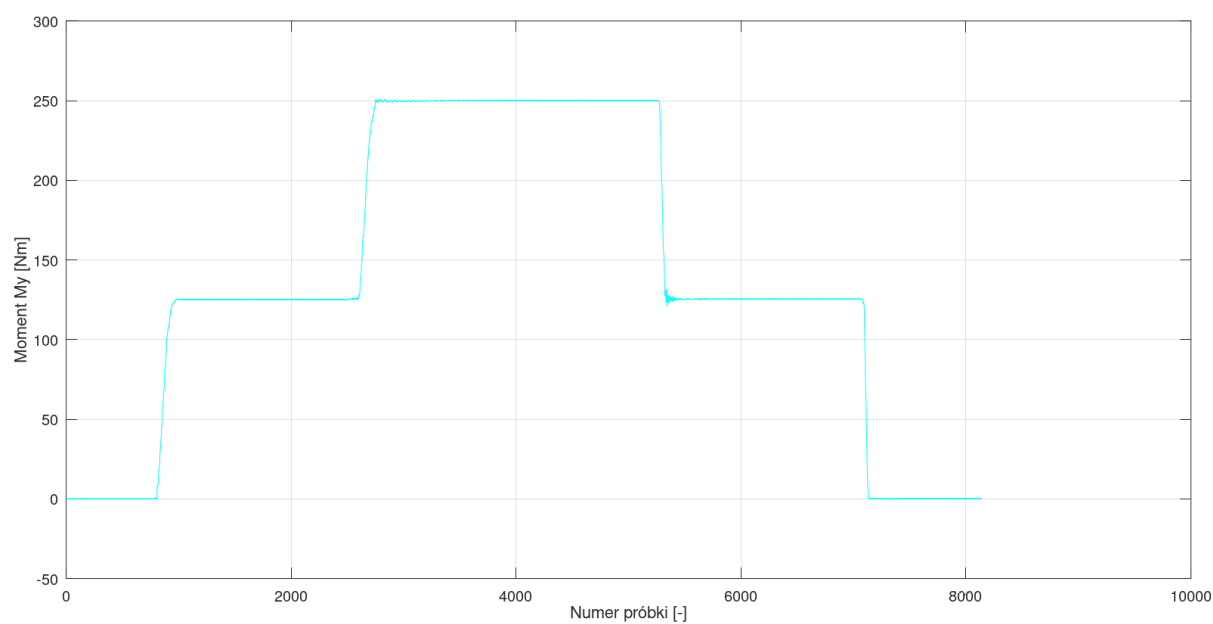
Rys. 4.17. Wartości siły F_y na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji



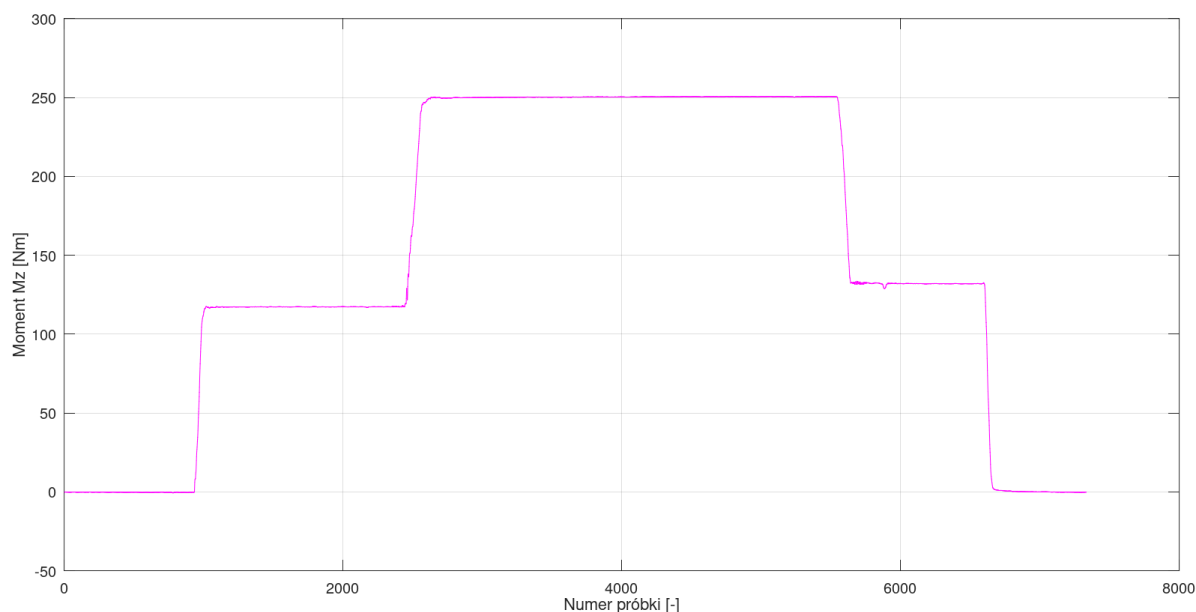
Rys. 4.18. Wartości siły F_z na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji



Rys. 4.19. Wartości momentu M_x na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji



Rys. 4.20. Wartości momentu M_y na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji



Rys. 4.21. Wartości momentu M_z na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji

4.6. Dokładność pomiarowa

Dokładność pomiarowa czujników została oszacowana na podstawie następujących składowych:

- pomiary były rejestrowane aparaturą QuantumX CX22B-W wyposażoną w uniwersalny wzmacniacz MX840B, którego klasa dokładności pomiarowej jak podaje producent wynosi 0,05%. Parametr ten wskazuje maksymalny dopuszczalny błąd, który wzmacniacz wprowadza do całkowitego pomiaru w normalnych warunkach pracy.
- Wzorce ciężaru 250N używane w czasie kalibracji sklasyfikowano jako obciążniki użytkowe klasy dokładności 2, których dopuszczalny błąd graniczny może wynosić 1%.
- Błąd liniowości czujnika przyjęto jako 0,5% względem pełnej skali pomiarowej na podstawie maksymalnego odchylenia wśród wszystkich analizowanych w tym celu pomiarów względem przyjętego wzorca ciężaru. W skrajnym przypadku korzystano z czterech obciążników.
- Histereza opisuje różnicę między odczytami czujnika przy przyłożeniu i odciążeniu tego samego poziomu obciążenia. Wyznaczono ją jako maksymalną różnicę między wartościami sygnału wyjściowego przy przyłożeniu i odciążaniu tego samego poziomu obciążenia i odniesiono do pełnej skali pomiarowej, wynosi ona 0,5%.

Błąd całkowity czujnika wyznaczono jako pierwiastek sumy kwadratów błędów cząstkowych i wynosi on 1,2%. Biorąc pod uwagę porównawczy charakter badań prowadzonych przy użyciu opracowanych dwóch, takich samych czujników wartość ta jest zadowalająca. Tym bardziej, że część błędów jak np. od wzorców ciężaru jest taka sama dla obu czujników i jest to błąd kalibracji.

4.7.Podsumowanie

Kierunkiem dalszych prac w zakresie badań czujników jest wykonanie dedykowanego wzmacniacza sygnałów z mostków tensometrycznych, który będzie umożliwiał bezpośredni odczyt wartości poszczególnych składowych obciążeń bez konieczności korzystania z drogiej aparatury pomiarowej. Zmniejszenie błędu całkowitego czujników będzie kolejnym kierunkiem działań. Jest to możliwe np. poprzez zastosowanie wzorcowanych obciążników wyżej klasy. Oba czujniki zostały skalibrowane w taki sam sposób i zamontowano je na stanowisku badawczym tj. na narzędziach pielących zamocowanych na mechatronicznej sekcji pielącej.

5. Model badawczy mechatronicznej sekcji pielącej i narzędzia

5.1. Specyfikacja funkcjonalna urządzenia

Przeprowadzona analiza literatury we wcześniejszych rozdziałach pracy przyczyniła się do zdefiniowania kluczowych parametrów pielenia mechanicznego. Rozważania dotyczyły głównie cech geometrycznych narzędzi skrawających glebę oraz ich różnego wpływu na interakcję między glebą a ostrzami tnącymi. Aby postawione w pracy hipotezy badawcze oraz zdefiniowane cele badawcze mogły być udowodnione i zrealizowane koniecznym było podjęcie pewnych założeń konstrukcyjno-projektowych i funkcjonalnych dla przedmiotu doktoratu:

- zmiana geometrii narzędzia oraz sekcji musi odbywać się automatycznie w celu możliwości łatwej regulacji parametrów oraz umożliwienia późniejszej adaptacji z systemami rolnictwa precyzyjnego.
- Przyjęto konieczność regulowania kąta skrawania α , który jest nazywany w literaturze także kątem wzniosu narzędzia.
- Ponadto założono możliwość regulowania kątów pochylenia ostrzy pielących β (kąty w płaszczyźnie prostopadłej do kąta skrawania α).
- Narzędzie o zmiennej geometrii musi posiadać wymienne dłuto z przodu w celu zmian wynikających ze zużycia lub szczególnych warunków glebowych wymagających dostosowania kąta skrawania samego dłuta.
- Założono automatyczną regulację głębokości pielenia, która ma znaczny wpływ na opory skrawania ale również na jakość wykonywanego pielenia mechanicznego.
- Z uwagi na przyjęte założenia dotyczące przeciwdziałania erozji wodnej gleb zdecydowano wyposażyć maszynę w możliwość regulowania pochylenia wszystkich narzędzi pielących zamontowanych na sekcji pielącej jednocześnie zmieniając kąt kontaktu z glebą. Kąt pochylenia narzędzi γ nazwano kątem roboczym sekcji pielącej.
- Projektowana konstrukcja musi zapewniać możliwość agregowania z ciągnikami rolniczymi oraz autonomicznymi robotami polowymi.
- Założono prowadzenie badań eksperymentalnych oraz analizowanie obciążeń w czasie pracy dlatego projektowane urządzenie musi posiadać kompletny układ pomiarowy umożliwiający przede wszystkim analizowanie sił i momentów skrawających w osiach X, Y i Z.

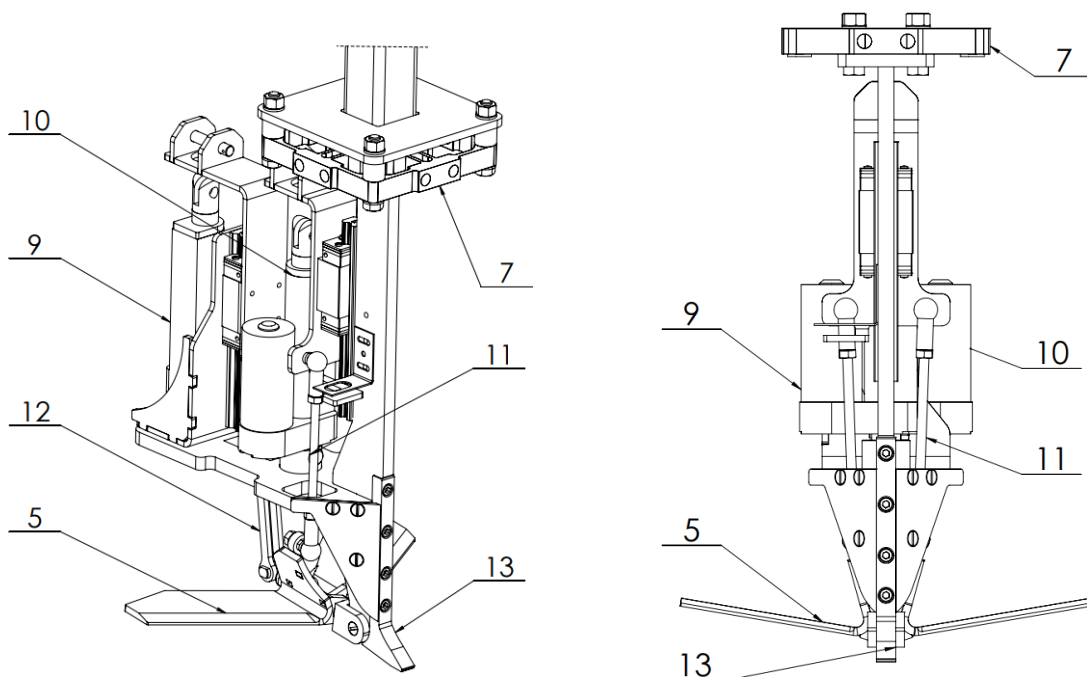
- Maszyna musi być odporna na przeciążenia wynikające z działania sił niezwiązanych z pieleniem mechanicznym np. uderzeniem w kamień.
- Geometria elementów skrawających (ostrzy) będzie zgodna z wymaganiami z tabela 9
- Urządzenie musi posiadać możliwość konfigurowania różnych ustawień narzędzi pielących w celu dostosowywania ich do różnych szerokości upraw rzędowych.
- Układ pomiarowy urządzenia będzie zapewniał możliwość zapisywania wyszczególnionych powyżej cech geometrycznych narzędzi w odniesieniu do oporów.

Mając na uwadze powyższą specyfikację funkcjonalną urządzenia jakim jest mechatroniczna sekcja pielące z narzędziem o zmiennej geometrii elementów skrawających głębę przystąpiono do jego projektowania.

5.2. Narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających

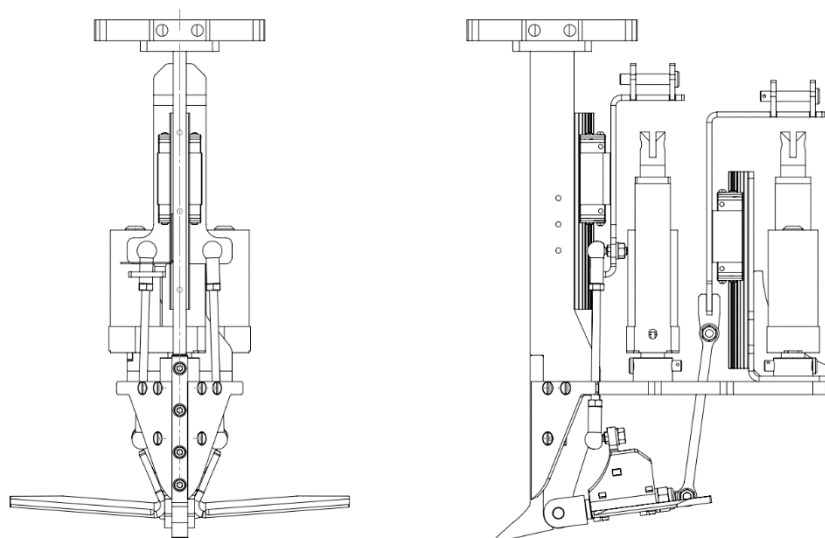
Jednym z głównych zadań badawczych było rozwiązanie problemu zmiany geometrii narzędzia pielącego w sposób automatyczny. W tym celu prowadzono wiele analiz kinematyki urządzenia, która musiała być odnoszona do geometrii całej sekcji pielącej w celu zapewnienia możliwości agregowania jej z szerokim zakresem maszyn, co było jednym z założeń projektowych. Zdefiniowana specyfikacja urządzenia w oparciu o przegląd literatury wykazał konieczność regulowania dwóch kątów ostrzy skrawających. Prezentowana konstrukcja miała przede wszystkim na celu udowodnienie postawionych hipotez i jej wygląd nie jest docelowym rozwiązaniem, w wielu przypadkach wymaga zastosowania uproszeń. W obecnym kształcie urządzenie posiada rozwiązania konstrukcyjne zapewniające możliwość łatwego wpływania na parametry geometryczne jak np. zmiany długości cięgieł, zmiany skoku siłowników czy stosowanie dodatkowych sensorów do kontrolowania procesu pielenia, które po serii badań mogą zostać przeprojektowane. Zasada działania urządzenia pozostaje jednak niezmienna. Narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających (rys. 5.1) zostało dostosowane do możliwości łatwego łączenia z zaprojektowanym w ramach doktoratu wieloosiowym czujnikiem obciążeń. Ostrza skrawające zamontowano obrotowo na obrotowym wale utwierdzonym z jednej strony w podstawie ramy głównej narzędzia, a z drugiej strony dwoma cięglami do prowadnicy liniowej i wózka przenoszącego większość obciążeń pielenia poza składową pionową siły, równoległą do zastosowanego napędu liniowego jakim jest siłownik

elektryczny. W ten sposób umożliwiono ruch ostrzy skrawających regulując kąt α . Obrótowe umieszczenie ostrzy skrawających umożliwiło dodatkowo regulowanie kąta w płaszczyźnie prostopadłej do toru jazdy narzędzia w czasie normalnej pracy na polu. Uzyskano to dzięki wprowadzeniu zakrzywienia na ostrzach w celu wyprowadzenia punktu zaczepu cięgien regulujących kąt β . Ponadto narzędzie posiada także założoną funkcję wymiany dłuta skrawającego przykręcanego czterema śrubami od czoła ramy głównej narzędzia.



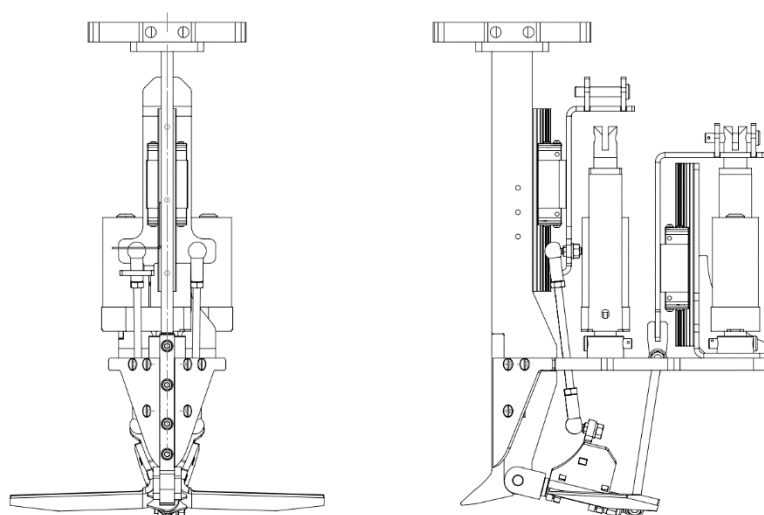
Rys. 5.1. Narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających, gdzie: 5 – ostrza skrawające glebę; 7 – wieoosiowy czujnik obciążeń; 9,10 – napędy liniowe; 11 – cięgło kąta β ; 12 – cięgło kąta α ; 13 – wymienne dluto.

Zakresy ruchów elementów skrawających są konfigurowalne w sposób automatyczny zależnie od skoku zastosowanego napędu liniowego, zakresy nastawialnych kątów z kolei wynikają z długości dobranych cięgien oraz zakresu pracy przegubów kulowych jako łączników między nożami skrawającymi glebę, a elementami pośredniczącymi utrzymującymi zadane położenie katowe.



Rys. 5.2. Skrajne, górne, ustawienie elementów skrawających głębę dla kąta α w narzędziu

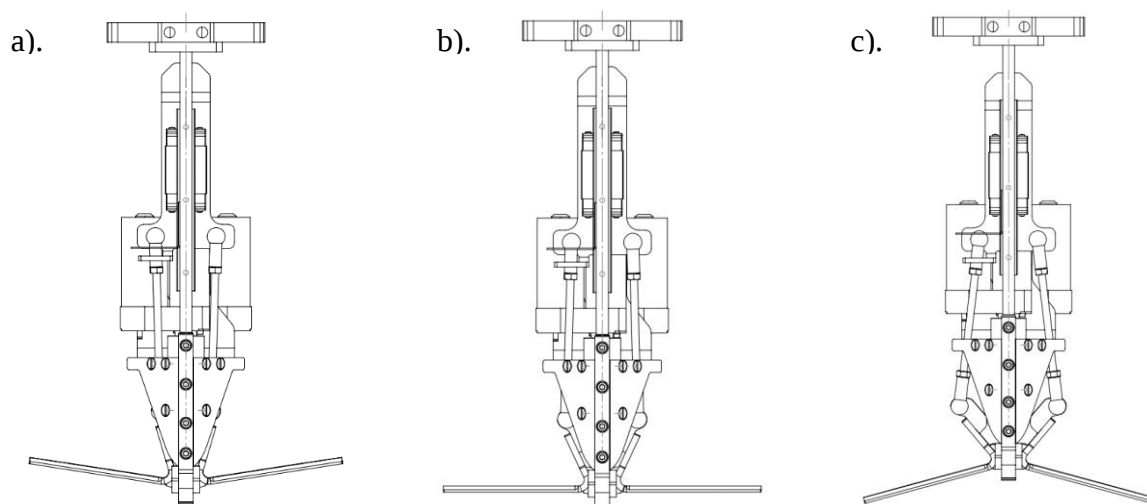
Nastawa kąta skrawania α , możliwa jest dzięki zastosowaniu układu cięgien połączonych z aktuatorem liniowym a centralnym wałkiem. Prezentowana konfiguracja długości cięgieł umożliwiła uzyskanie kąta α w zakresie od -10 do 10 stopni (rys. 5.2 i rys. 5.3) i właśnie w tej konfiguracji narzędzie było poddawane testom eksperymentalnym, polowym.



Rys. 5.3. Skrajne, dolne, ustawienie elementów skrawających głębę dla kąta α w narzędziu

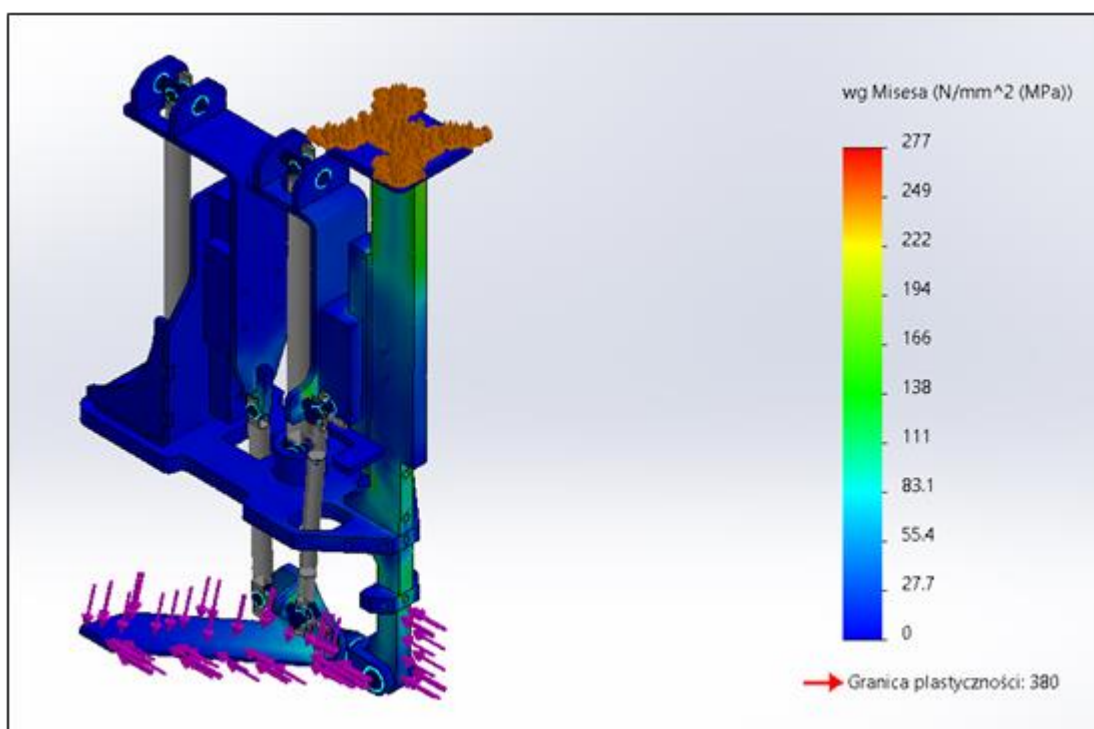
Mechatroniczne narzędzie zostało ponadto wyposażone w funkcję konfigurowania kąta pochylenia ostrzy skrawających w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku jazdy – w dalszej części pracy opisywany jako kąt β . Różne konfiguracje pracy urządzenia zaprezentowano na

rys. 5.4. Projektując układ kinematyczny dążono do zapewnienia jak najwyższego górnego zakresu położenia elementów skrawających.



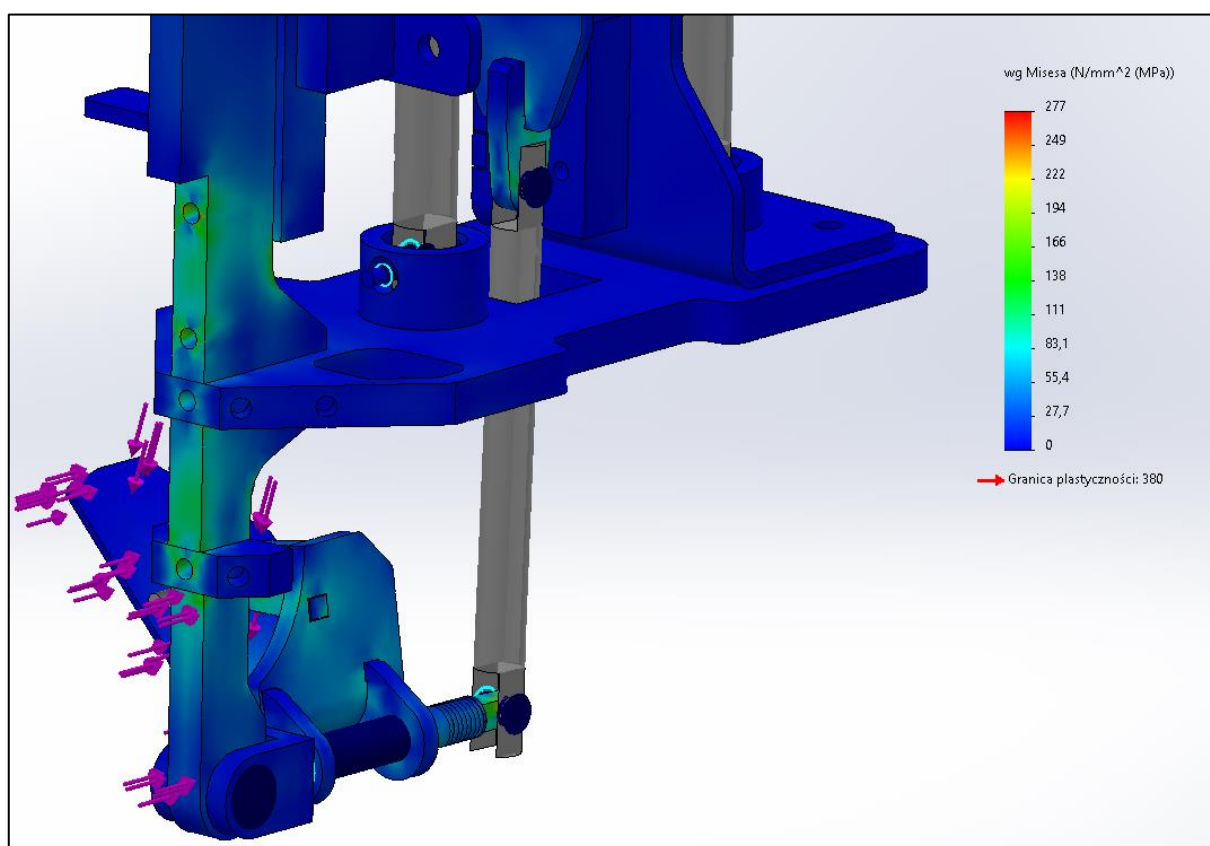
Rys. 5.4. Ustawienia elementów skrawających glebę dla kąta β w narzędziu, gdzie: a – skrajne górne ustawienie; b – ustawienie poziome względem płaszczyzny podłoża; c – skrajne dolne ustawienie.

W celu weryfikacji wytrzymałości konstrukcji mechatronicznego narzędzia przeprowadzono serię analiz MES. Kontakt między elementami współpracującymi został zasymulowany poprzez połączenia kołkowe. Ciągła oraz siłowniki przenoszące obciążenia zasymulowano jako sprzęgła cardana – dzięki temu uniknięto przesztynnień modelu w symulacji. Konstrukcję narzędzia w analizie zamocowano na uchwycie przy użyciu mocowania „nieruchomą geometrią”. Na podstawie analiz literaturowych konstrukcja została obciążona następującymi obciążeniami: siłą pionową działającą na powierzchnię ostrza $F_1=150\text{N}$; siłą $F_2=500\text{N}$ przyłożoną od czoła narzędzia prostopadle do ramy głównej; siłą $F_3 = 250\text{N}$ przyłożoną prostopadle do czoła ostrza skrawającego glebę. Jako materiał przyjęto stal konstrukcyjną S355. Prowadzone iteracyjnie analizy wytrzymałościowe wpływały na zmiany ostatecznej konstrukcji urządzenia.



Rys. 5.5. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia skrajnego działającego na układ w czasie pracy

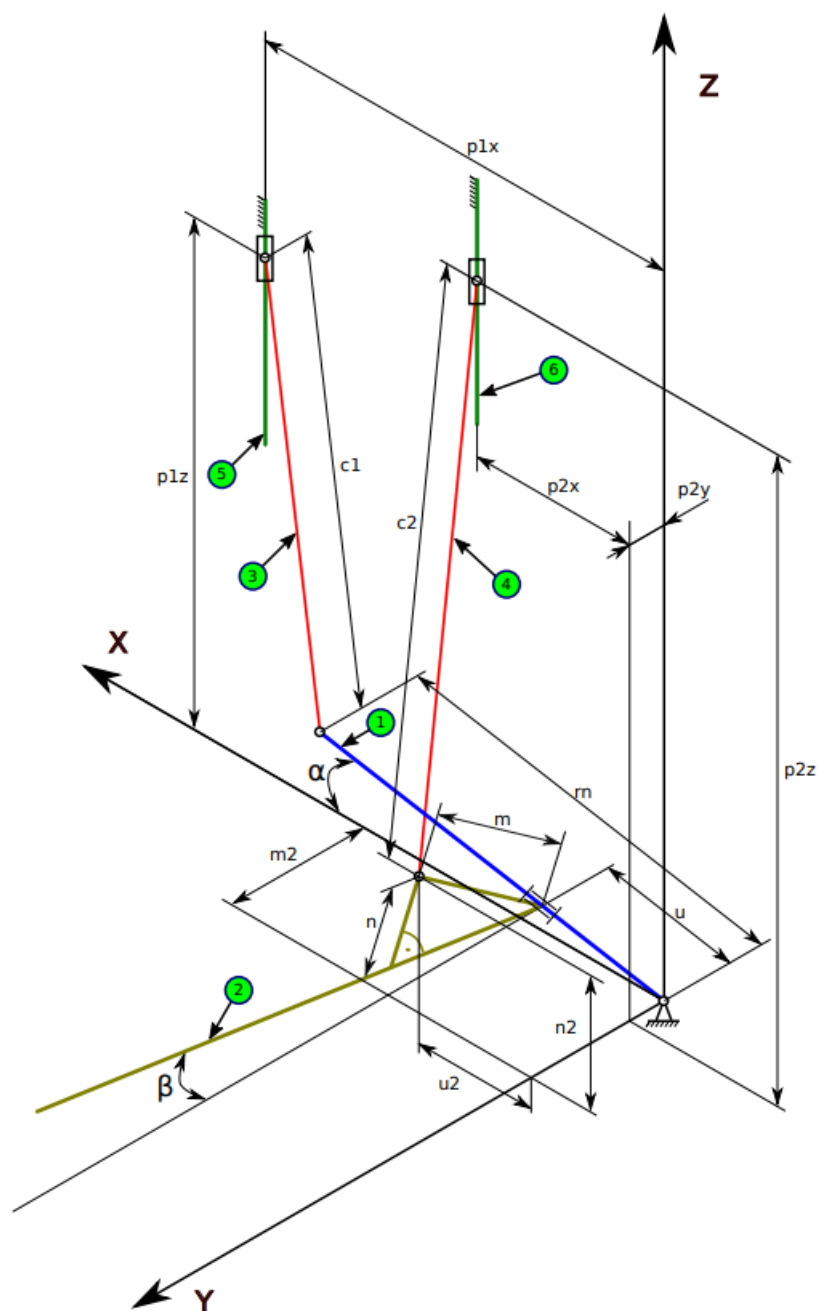
Na zamieszczonych rysunkach (rys. 5.5 i rys. 5.6) zaprezentowano rozkład naprężeń dla badanego przypadku obciążeniowego. Zidentyfikowano w ten sposób wyężenia konstrukcji i wprowadzono niezbędne usprawnienia. Równolegle prowadzono prace związane z opracowaniem kinematyki sekcji pielącej jako elementu spinającego narzędzia i umożliwiającego agregowanie z urządzeniami rolniczymi – są one przedmiotem zgłoszenia patentowego. Konstrukcja na bieżąco była dostosowywana do spełnienia wymagań funkcjonalnych oraz wytrzymałościowych. Wykonany szereg prac w tym analiz literatury, funkcjonalności, kinematyki i wytrzymałości zmieniał na bieżąco konstrukcję sekcji mechatronicznej oraz samego narzędzia. Efektem prowadzonych prac jest modułowa, stabilna i wytrzymała na założone warunki pracy konstrukcja. Najważniejszy element układu pomiarowego tj. czujnik analizy obciążeń na skutek prowadzonych analiz wytrzymałościowych i technologicznych został wykonany wedle pierwotnych założeń funkcjonalnych i zamontowany na urządzeniu.



Rys. 5.6. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia skrajnego działającego na układ w czasie pracy

Prowadzone w doktoracie badania wpływu zmian geometrii narzędzia na obciążenia generowane w czasie pielienia wymagało umożliwienia dokonywania automatycznych zmian kątów narzędzia. Koniecznym było dobranie odpowiednich pod względem skoku oraz obciążeń maksymalnych napędów wraz z czujnikami położenia. Zdecydowano się zastosować siłowniki elektryczne, które spełniały postawione założenia. Sterowanie kątami było możliwe między innymi dzięki wyprowadzeniu zależności kinematycznych między kątami pochylenia a położeniem napędów liniowych, wymuszających ruchy urządzenia.

Rys. 5.7 prezentuje kinematykę zaprojektowanego narzędzia. Elementy konstrukcyjne oznaczone na rysunku numerami to: 1 – wałek montażu ostrzy skrawających utwierdzony obrotowo na konstrukcji nośnej narzędzia odpowiedzialne za zmianę kąta α ; 2 – ostrze skrawające glebę; 3 – cięgno zmiany kąta α ; 4 – cięgno zmiany kąta β ; 5 – prowadnica liniowa napędu zmiany kąta α ; 6 – prowadnica liniowa napędu zmiany kąta β .



Rys. 5.7. Schemat kinematyki mechatronicznego narzędzia o zmiennej geometri kątów elementów skrawających głębę

Na podstawie rysunku pomocniczego (rys. 5.8) wyznaczono analitycznie zależność między położeniem suwaka prowadnicy liniowej (3) napędu zmiany kąta α ($p1z$) w funkcji kąta skrawania α , na podstawie położenia wałka montażu ostrzy skrawających (1), których elementem łączącym jest cięgno zmiany kąta α (2):

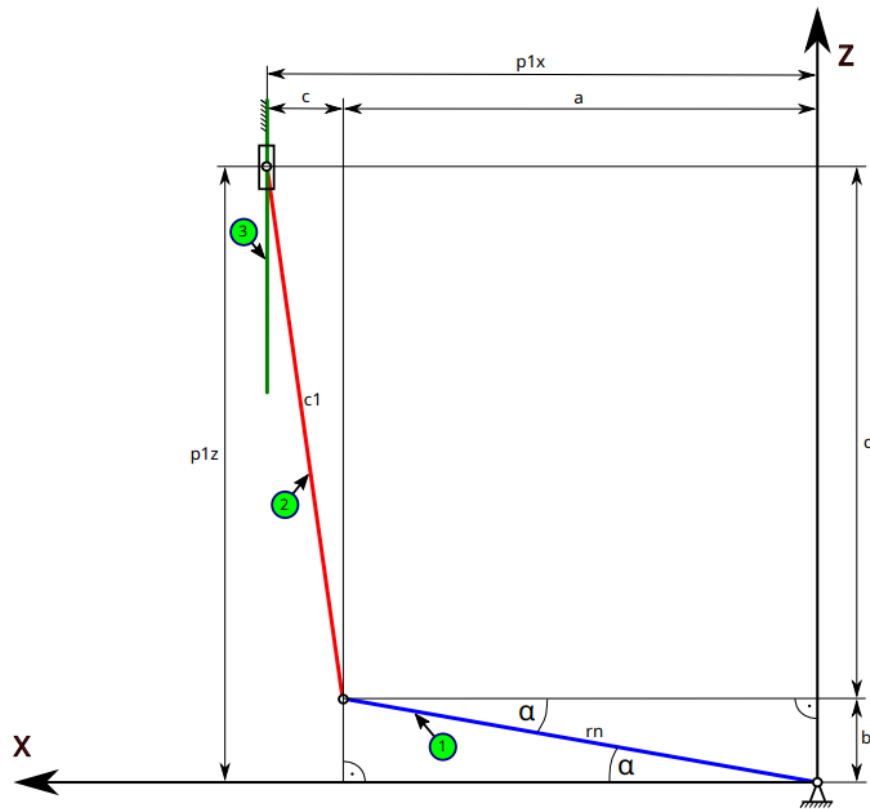
$$a = r_n \cdot \cos \alpha \quad 5.1$$

$$b = r_n \cdot \sin \alpha \quad 5.2$$

$$c = p1x - a \quad 5.3$$

$$d = \sqrt{c_1^2 - c^2} \quad 5.4$$

$$p1z = d + b \quad 5.5$$

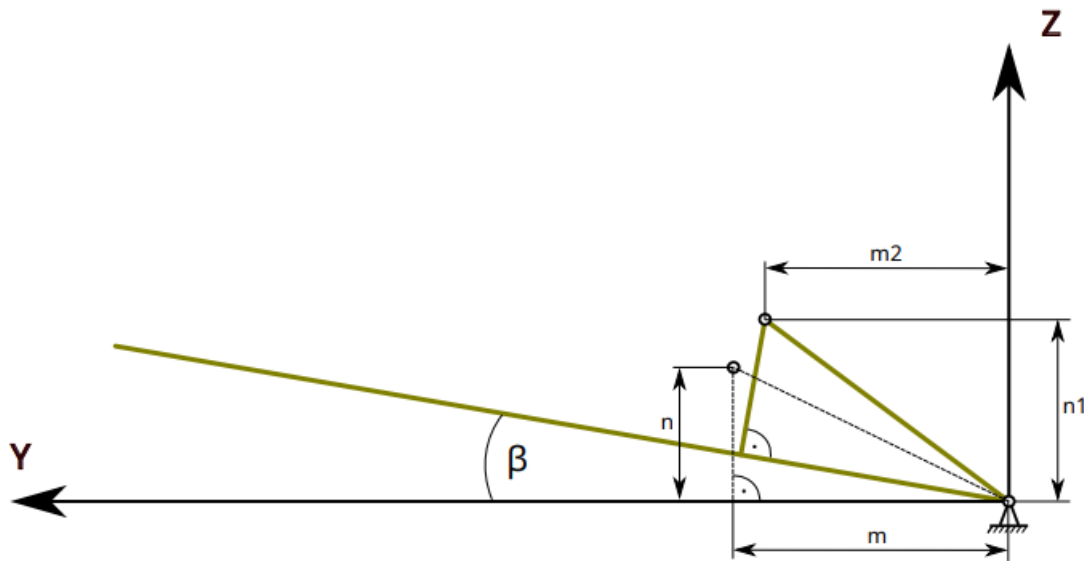


Rys. 5.8. Schemat kinematyki położenia suwaka prowadnicy liniowej napędu zmiany kąta skrawania α

Kolejnym krokiem było wyznaczenie zależności położenia przegubu ostrza skrawającego, przy założonym kącie skrawania $\alpha=0$, dla zadanego kąta poprzecznego pochylenia noża β – posłużono się rysunkiem pomocniczym (rys. 5.9). Wyprowadzono następujące zależności:

$$m_1 = m \cdot \cos \beta - n \cdot \sin \beta \quad 5.6$$

$$n_1 = m \cdot \sin \beta + n \cdot \cos \beta \quad 5.7$$



Rys. 5.9. Schemat kimenatyki położenia przegubu ostrza skrawającego dla zadanego położenia kąta β

Następnym krokiem było wyznaczenie zależności dla pozycji przegubu ostrza skrawającego, przy zadanym kącie wzdłużnego pochylenia noża α (kącie skrawania) i dla zadanego kąta poprzecznego pochylenia noża β . Zależności wyprowadzono w oparciu o rysunek pomocniczy (rys. 5.10).

$$u_2 = u \cdot \cos \alpha - n_1 \cdot \sin \alpha \quad 5.8$$

$$n_2 = u \cdot \sin \alpha + n_1 \cdot \cos \alpha \quad 5.9$$

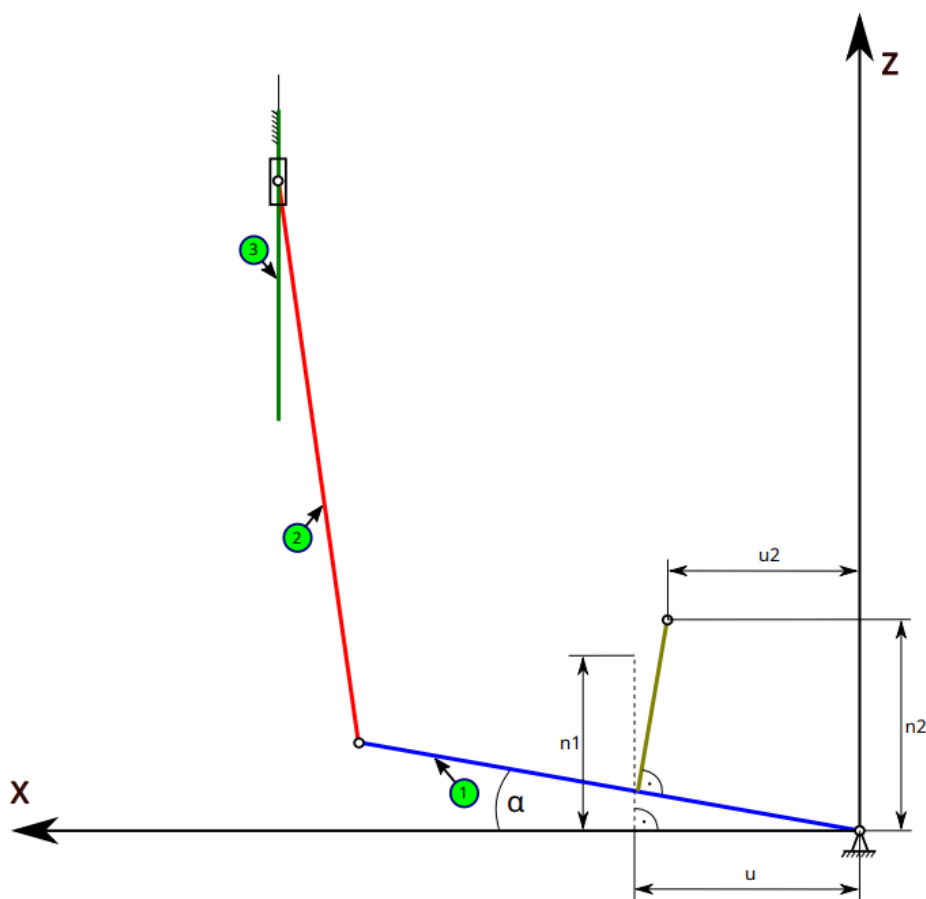
Wyprowadzone równania (5.1 – 5.9) umożliwiły wyznaczyć zależność dla położenia suwaka prowadnicy liniowej w funkcji kątów α i β . Początek układu odniesienia znajduje się w punkcie obrotowego umieszczenia wałka na osi montażu ostrzy skrawających, w położeniu równoległym do podłoża (płaszczyzna XZ). Kierunki i zwroty poszczególnych osi przedstawiono na rys. 5.7. Wyprowadzona zależność 5.10 opisuje czynniki wpływające na długość ciągu zmiany kąta β .

$$c_2 = \sqrt{(u_2 - p_2x)^2 + (m_2 - p_2y)^2 + (n_2 - p_2z)^2} \quad 5.10$$

Korzystając z programu wxMaxima wyprowadzono dwie zależności (5.11 i 5.12), które opisują położenie suwaka prowadnicy liniowej napędu zmiany kąta β . Po rozwiązaniu równań wynik z mniejszą wartością (poniżej punktu przegubu wału) należy odrzucić.

$$p_2 z = n_2 - \sqrt{(-u_2)^2 + 2 \cdot p_2 x \cdot u_2 - (p_2 y)^2 + 2 \cdot m_2 \cdot p_2 y - (p_2 x)^2 - (m_2)^2 + (c_2)^2} \quad 5.11$$

$$p_2 z = n_2 + \sqrt{(-u_2)^2 + 2 \cdot p_2 x \cdot u_2 - (p_2 y)^2 + 2 \cdot m_2 \cdot p_2 y - (p_2 x)^2 - (m_2)^2 + (c_2)^2} \quad 5.12$$



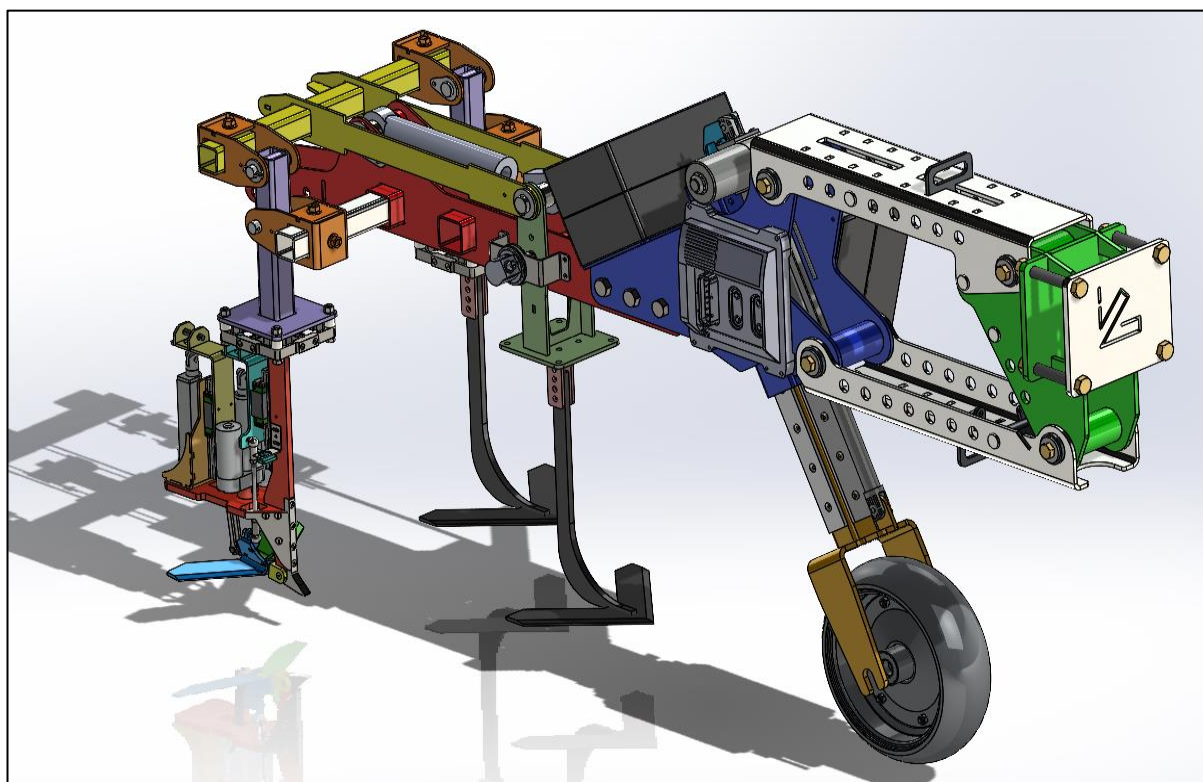
Rys. 5.10. Schemat kinematyki położenia przegubu przy zadanych kątach: skrawania α i poprzecznego pochylenia noża β

Wyprowadzone zależności zostały przeanalizowane w warunkach laboratoryjnych na wykonanym prototypie mechatronicznej sekcji pielącej. Wprowadzenie zmiennych do analiz kinematycznych dało możliwość uwzględniania niedokładności wykonania lub montażu urządzenia oraz ułatwia ewentualne wprowadzanie zmian do długości cięgien zmiany kątów α i β .

Konstrukcja mechatronicznego narzędzia o zmiennej geometrii ostrzy skrawających jest zarazem stanowiskiem badawczym, które kompleksowo analizuje zachowanie narzędzia w czasie pracy, którego zasada działania została opisana w następnym rozdziale.

5.3. Mechatroniczna sekcja pieląca

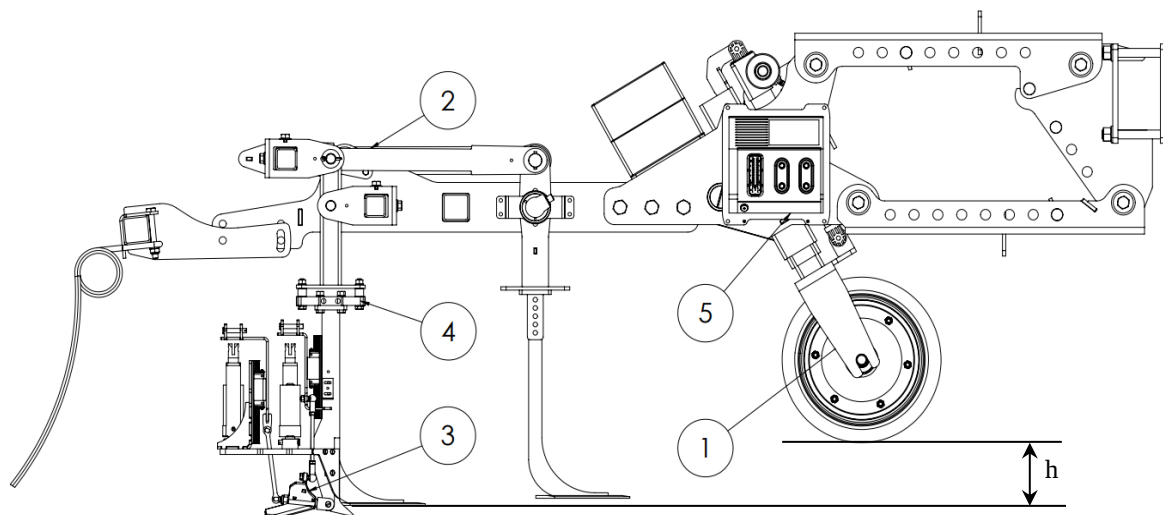
Ostateczny wygląd modelu sekcji pielącej spełnia założenia funkcjonalne zdefiniowane na podstawie przeglądu literaturowego z rozdziału 5.1 i jego ostateczny wygląd z podziałem na komplety spawalnicze zaprezentowano na rys. 5.11.



Rys. 5.11. Model CAD mechatronicznej sekcji pielącej wyposażonej w narzędzie o zmiennej geometrii kątów skrawania gleby

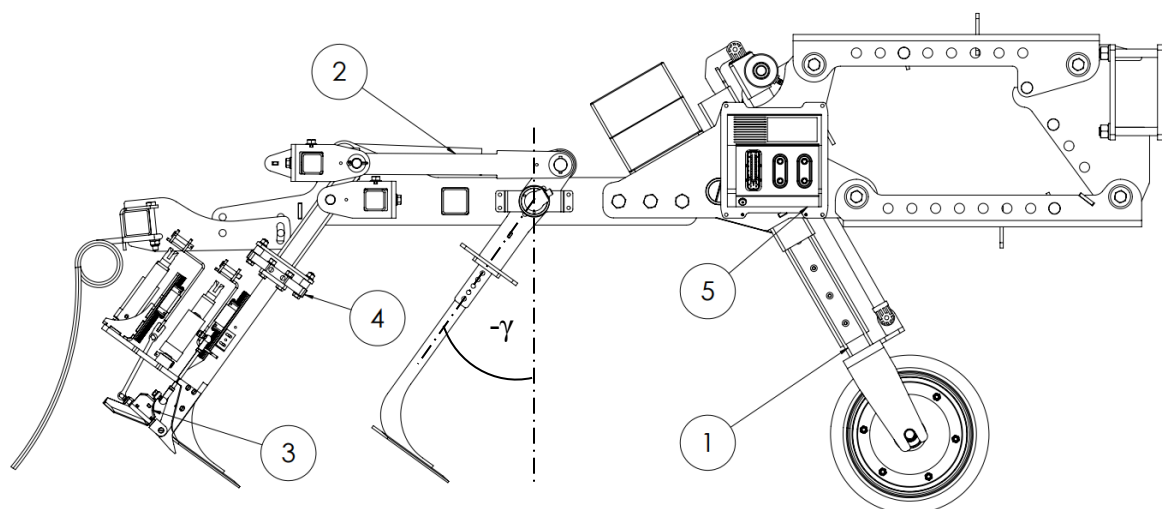
Urządzenie umożliwia zmianę szerokości roboczej poprzez swobodną podmianę narzędzi skrawających glebę oraz możliwość przesuwu uchwytów mocujących, w zakresie wynikającym z szerokości belek montażowych. Na potrzeby udowodnienia postawionych w doktoracie hipotez, urządzenie było testowane w konfiguracji jak na rys. 5.11 z demontowanym narzędziem środkowym. Sekcja pieląca (rys. 5.12) wyposażona jest w następujące kluczowe dla jej funkcjonalności elementy: 1 – wysuwane koło kopiujące teren; 2 – napęd zmiany kąta roboczego sekcji γ ; 3 – narzędzie o zmiennej geometrii; 4 – czujnik do analizowania obciążeń narzędzi; 5 – mobilny sterownik PLC. Urządzenie wedle założeń umożliwia łatwą, automatyczną, zmianę głębokości pielienia h , której wartość obliczana jest na

bieżący w sterowniku maszyny jako odległość między kołem podporowym, a osią X układu współrzędnych narzędzia o zmiennej geometrii.

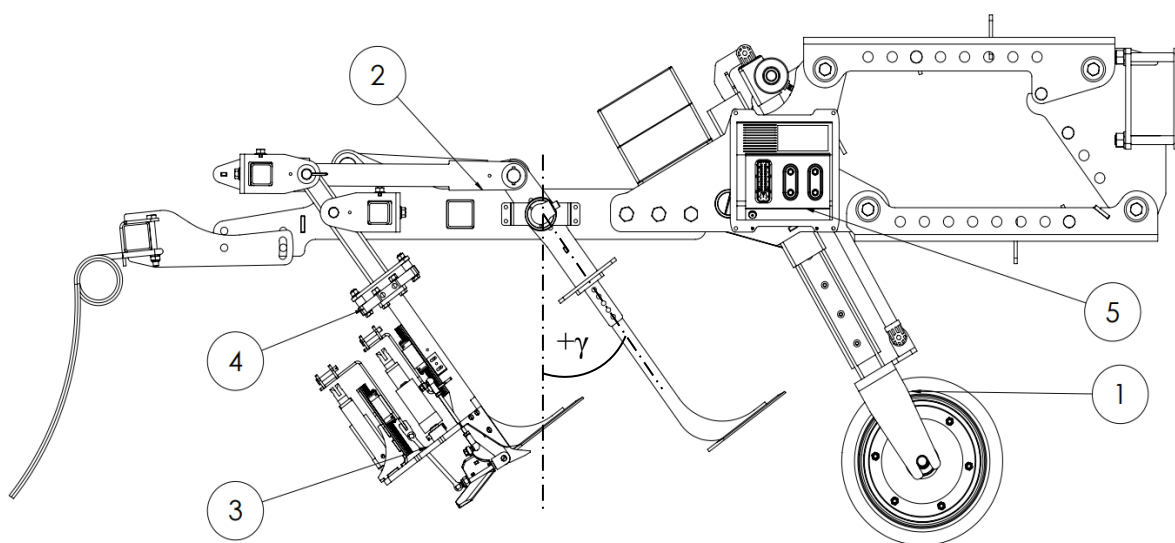


Rys. 5.12. Mechatroniczna sekcja pieląca w pionowym ułożeniu narzędzi pielących z ustawieniem maksymalnej głębokości pielienia

Jedną z kluczowych funkcjonalności urządzenia jest możliwość formowania powierzchni gleby na wzniesieniach w celu zapobiegania erozji wodnej pól uprawnych. Sekcja pieląca w prezentowanej konfiguracji posiada trzy obrotowe uchwyty osadzenia narzędzi, które dają możliwość zmiany długości lub zmiany kątów rozwarcia narzędzi, oprócz wspomnianej zmiany geometrii kątów skrawania. Uchwyty narzędzi spięto obrotowo elementem pośredniczącym, który spina wszystkie ruchome uchwyty z siłownikiem hydraulicznym – napędem zmiany kąta roboczego sekcji γ . Siłownik hydrauliczny może również pełnić funkcję bezpiecznika przed przeciążeniem (pod warunkiem dodania odpowiednich zaworów do układu hydraulicznego), a wyposażenie wahliwych uchwytów narzędzi w absolutny encoder obrotowy pozwala układowi, w momencie zmiany kąta γ wynikającego z przeciążenia, powrót do pierwotnych ustawień. Przyjęto, że wysunięcie siłownika powoduje, zmniejszenie kąta γ (rys. 4.13), a schowanie tłoka jego przyrost (rys. 5.14). Położenie neutralne tzn. z narzędziami ustawionymi pionowo jest uznawane za kąt pracy stosowany w czasie normalnej pracy.



Rys. 5.13. Mechatroniczna sekcja pieląca ze skrajnym, tylnym, położeniem narzędzi pielących z maksymalnym wysunięciem koła kopiującego



Rys. 5.14. Mechatroniczna sekcja pieląca ze skrajnym, przednim, położeniem narzędzi pielących z maksymalnym wysunięciem koła kopiującego

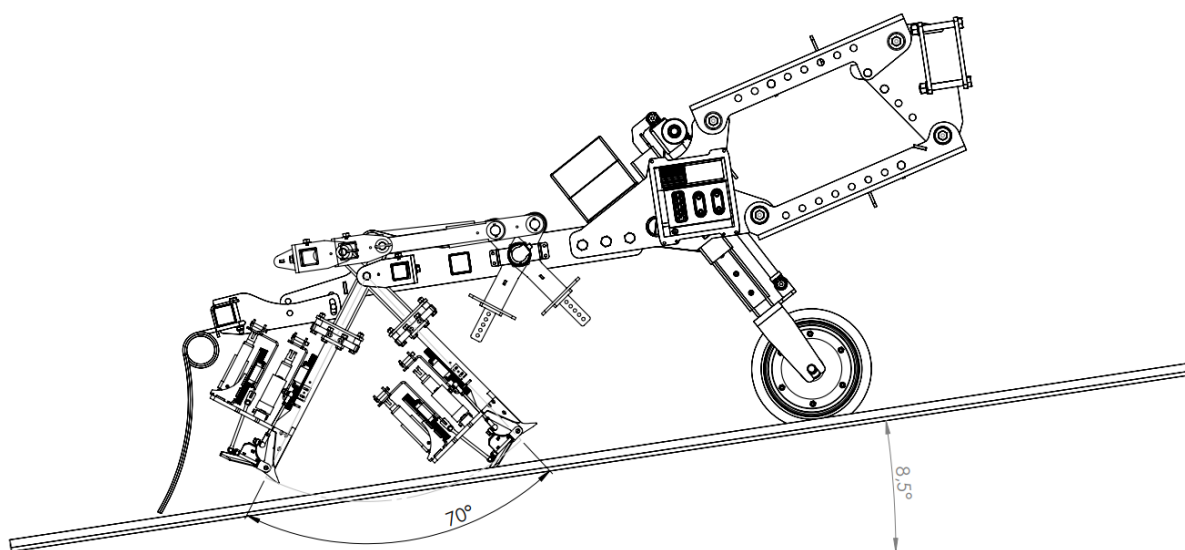
Sekcja została również wyposażona w demontowalny zgarniacz chwastów, umieszczony z tyłu urządzenia, który ma za zadanie wygarnianie chwastów po właściwym podcięciu ich przez ostrza skrawające. W ten sposób wystawione na działanie słońca oraz temperatury rośliny obumierają szybciej, zmniejszając w ten sposób prawdopodobieństwo ponownego wypuszczenia pędów.

5.4. Podsumowanie i wnioski

Projekt mechatronicznej sekcji cechuje się modułowością, która zapewnia urządzeniu uniwersalność do prowadzenia wielu, zróżnicowanych, badań. Przede wszystkim możliwość wykonywania porównawczych badań w kierunku wyznaczania obciążeń w czasie pracy oraz drgań generowanych przez narzędzia rolnicze. Ponadto daje możliwość do wyznaczania parametrów pracy narzędzia w warunkach polowych – zapewniając możliwość odnoszenia tych wyników do warunków glebowych identyfikowanych poprzez badania glebowe lub zdjęcia satelitarne. Dodatkową funkcją jest również możliwość testowania algorytmów do formowania gleby w zależności od jej właściwości na wzniesieniach, w celu przeciwdziałania erozji wodnej gleb.

6. Przeciwdziałanie erozji wodnej gleb

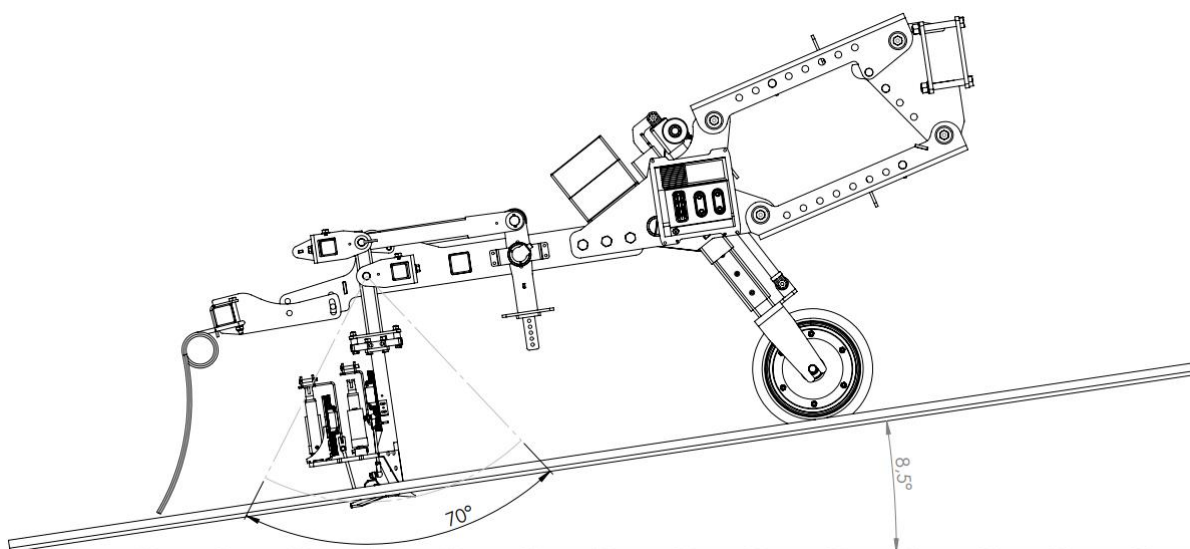
Funkcja przeciwdziałania erozji wodnej gleb jest pomysłem, który zrodził się w miarę prowadzonego przeglądu literaturowego. Wprowadzanie automatyzacji do nastawiania geometrii narzędzia pielącego wraz z możliwością łatwej korekty głębokości pielenia skłoniło do rozbudowania zakresów ruchów sekcji pielącej poprzez zapewnienie funkcji pochylenia narzędzi o kąt γ (rys. 6.1). Głównym założeniem było umożliwienie ruchów elementów skrawających glebę na wzniesieniach, których kąt nachylenia wynosi do 8,5 stopnia. Wartość ta została ustalona na podstawie normy PN-EN ISO 4254-1, która definiuje warunek zachowania stateczności maszyn właśnie na takim pochyleniu, jest to więc zakres będący niezbędnym minimum, które determinowało etap projektowania mechatronicznej sekcji. Wspomniany kąt nachylenia podłoża jest założonym minimum, ale urządzenie daje możliwość pracy również przy wyższych wartościach, które w dużej mierze zależą od przyjętej strategii działania w kierunku przeciwdziałania erozji wodnej gleb.



Rys. 6.1. Skrajne zakresy ruchów narzędzi pielących o kąt γ dla przypadku przyjętego kąta pochylenia podłoża

Wspomniane zjawisko polega na wymywaniu i przemieszczaniu cząsteczek gleby przez wodę opadową lub wodę powierzchniową, co w efekcie prowadzi do degradacji struktury gleby, zmniejszenia jej żyzności oraz zmniejszenia plonów wymywając również słabo ukorzenione rośliny uprawne. Uprawy rzędowe dodatkowo potęgują to zjawisko ze względu na tworzenie strumieni wody w czasie ulewnych deszczy. Opisany mechanizm erozji wodnej

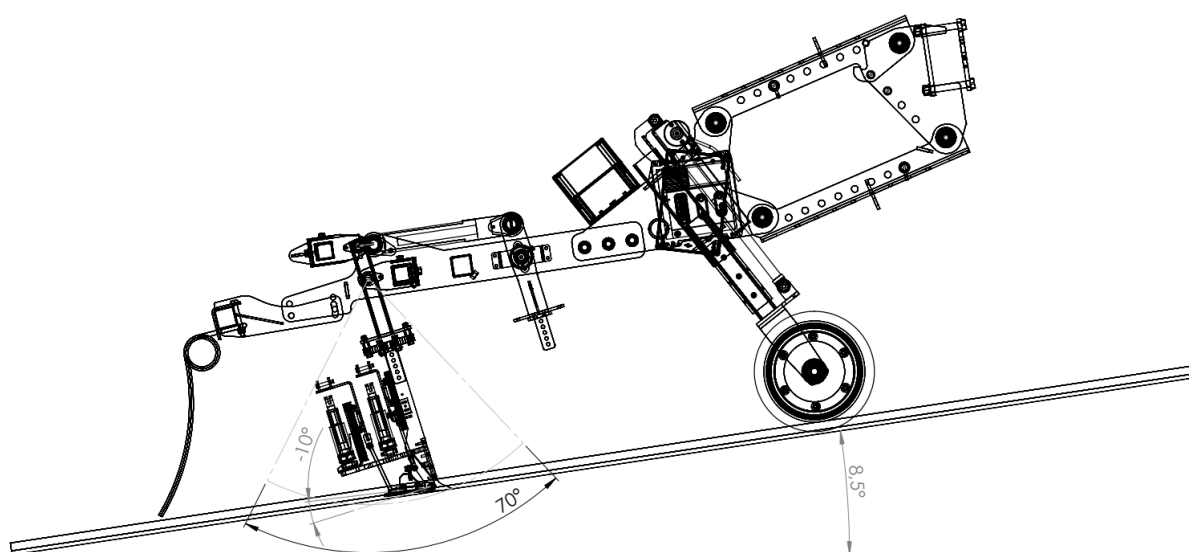
nasuwa możliwość przeciwdziałania jej poprzez bardziej świadome planowanie ścieżek technologicznych dla upraw np. nie wzdłuż pochylenia, co w połączeniu z proponowanym wpływaniem na kształt powierzchni gleby może przyczynić się do ograniczenia tego zjawiska.



Rys. 6.2. Pionowe ustawienie narzędzi pielących względem przyjętego kąta pochylenia podłoża

Jednym z założeń jest połączenie procesu pielienia mechanicznego z wprowadzeniem oscylacyjnego ruchu narzędzi poprzez ruch w zakresie kąta γ . Powodując w ten sposób tworzenie na powierzchni pola niewielkich wzniesień, które według założeń będą powodowały bardziej równomierne odprowadzanie nadmiaru wody, którego gleba nie może przyjąć. Zaproponowana kinematyka sekcji w połączeniu z narzędziem o zmiennej geometrii umożliwia dwa główne jego zastosowania: spulchnianie gleby z głównym nastawieniem na przeciwerozyjne formowanie powierzchni pola (rys. 6.2) lub pielienie mechaniczne wraz ze wspomnianą funkcją (rys. 6.3). W przypadku wybrania jako nadrzędnego procesu pielienia mechanicznego, kształtowanie gleby będzie musiało być ograniczone z uwagi na konieczność prawidłowego podcinania korzeni chwastów. W tym celu narzędzie zostało wyposażone w możliwość ustawiania kąta skrawania α w wartościach ujemnych – według przyjętego sposobu oznaczania. Dzięki kompensowaniu pochylenia maszyny poprzez wprowadzanie lokalnych korekt w ostrzach narzędzia istnieje możliwość pełnej kontroli zabiegu. Jest to jeden z kierunków prowadzenia dalszych badań, ponieważ zagadnienie wymaga szerokiego rozpoznania w zakresie analiz algorytmów, które mogłyby przyczyniać się do osiągnięcia wspomnianych założeń. Do ich wstępnej oceny mogą nadawać się wymienione w przeglądzie literaturowym metody numerycznego wyznaczania obciążeń, które zapewniają głównie

możliwość symulowania zachowania materiałów płynnych. Analizując wpływ kształtu i ustawienia narzędzi na późniejszą dynamikę wody na powierzchni gleby, można weryfikować w uproszczony sposób przepływy wód opadowych i ich interakcję z glebą. W tym kontekście szczególnie istotne jest zrozumienie poprzez prowadzenie analiz numerycznych i eksperymentalnych, jak lokalne korekty w ostrzach narzędzi mogą wpływać na redystrybucję wody na polu, co mogłoby prowadzić do ograniczenia erozji wodnej. Dzięki symulacjom numerycznym możliwe jest opracowanie rozwiązań, które kontrolują spływ wody, zmniejszając jej negatywny wpływ na glebę poprzez zmniejszenie skutków erozji. W ten sposób dalsze badania mogą skupiać się na optymalizacji algorytmów sterowania, które pozwolą na dostosowanie działania narzędzi do warunków terenowych, wspomagając ochronę gleby przed degradacją. Według obecnego stanu wiedzy możliwe są dwa podejścia do problematyki tematu. Wspominane spalanie gleby i formowanie wybrzuszeń na powierzchni pól albo pozostawianie gleby nienaruszonej na krótkich odcinkach, aby jej naturalna struktura lepiej utrzymywała cząstki gleby w czasie ulewnych deszczy.



Rys. 6.3. Pionowe ustawienie narzędzi pielących względem przyjętego kąta pochylenia podłoża z uwzględnioną korektą kąta skrawania α w narzędziu o zmiennej geometrii

7. Wyniki badań i ich analiza

7.1. Przedmiot badań

Jedną z cech funkcjonalnych urządzenia była możliwość agregowania go z ciągnikami lub pojazdami autonomicznymi. Kompatybilność z robotami polowymi oraz możliwość wydłużania ich pracy na jednym ładowaniu baterii była jednym z czynników, które skłoniły do podjęcia tematu doktoratu. Mechatroniczna sekcja pielęgnująca z narzędziem o zmiennej geometrii została zamontowana na maszynie autonomicznej, która jest jednym z efektów projektu POIR.01.01.01-00-1230/19 (rys. 7.1). Robot polowy wyposażony we własny układ sterowania pozwalał na dużą dowolność prowadzenia badań oraz dodatkowo zweryfikowano założenia konstrukcyjne dla przedmiotu doktoratu.



Rys. 7.1. Autonomiczny robot polowy firmy Unia z napędami elektrycznymi z zamontowanym stanowiskiem badawczym



Rys. 7.2. Autonomiczny robot polowy firmy Unia z napędami elektrycznymi z zamontowanym stanowiskiem badawczym

Mechatroniczna sekcja pieląca została zamontowana na uchwycie narzędziowym robota w jego środku geometrycznym (rys. 7.2), co jest najczęstszą konfiguracją ustawień do pielienia upraw szerokokorządowych. Uchwyt robota miał funkcję dostosowywania jego wysokości. Przedmiotem badań było wykazanie zależności między parametrami geometrycznymi narzędzi pielących a obciążeniami generowanymi w czasie normalnej pracy przy użyciu stanowiska badawczego (rys. 7.3). Założono, że poprzez zastosowanie automatycznych elementów sterujących narzędziami możliwe jest dokonywanie niezbędnych korekt w czasie pielienia celem utrzymywania stałej głębokości ścinania korzeni chwastów i gleby oraz zmniejszania oporów narzędzi w zróżnicowanych typach i właściwościach gleby. Rejestrowane przez układ pomiarowy sygnały były odnoszone do prędkości jazdy oraz geometrii narzędzi w dwóch konfiguracjach ustawień narzędzi: z zamontowanym środkowym narzędziem pielącym oraz ze zdemonstrowanym. Zapewniło to równomierniejsze rozłożenie masy sekcji na dwóch narzędziach wyposażonych w komplet sensorów. Oprócz parametrów związanych typowo z działaniem maszyny, wyniki badań odniesiono do właściwości gleby w celu lepszego zobrazowania warunków pracy maszyny. Elementy elektroniczne sekcji pielącej były zasilane

z baterii robota, natomiast elementy hydrauliki siłowej były zasilane poprzez agregat hydrauliczny umieszczony na robocie. Rejestrator sygnałów posiadał, osobne, niezależne źródło zasilania jakim był agregat prądotwórczy przymocowany do ramy nośnej robota. Badania były prowadzone przy różnych głębokościach pielenia dzięki możliwości zmiany nastawy koła podporowego sekcji, jednak głównie przy głębokości 30 mm z uwagi na warunki glebowe na polu. Zastosowanie równoległoboku zapewniało ograniczenie wpływu zmian głębokości na ułożenie kątów ścinania elementów skrawających narzędzi. Sterowanie robotem było realizowane z poziomu bezprzewodowego pilota wyposażonego w niezbędne systemy bezpieczeństwa.



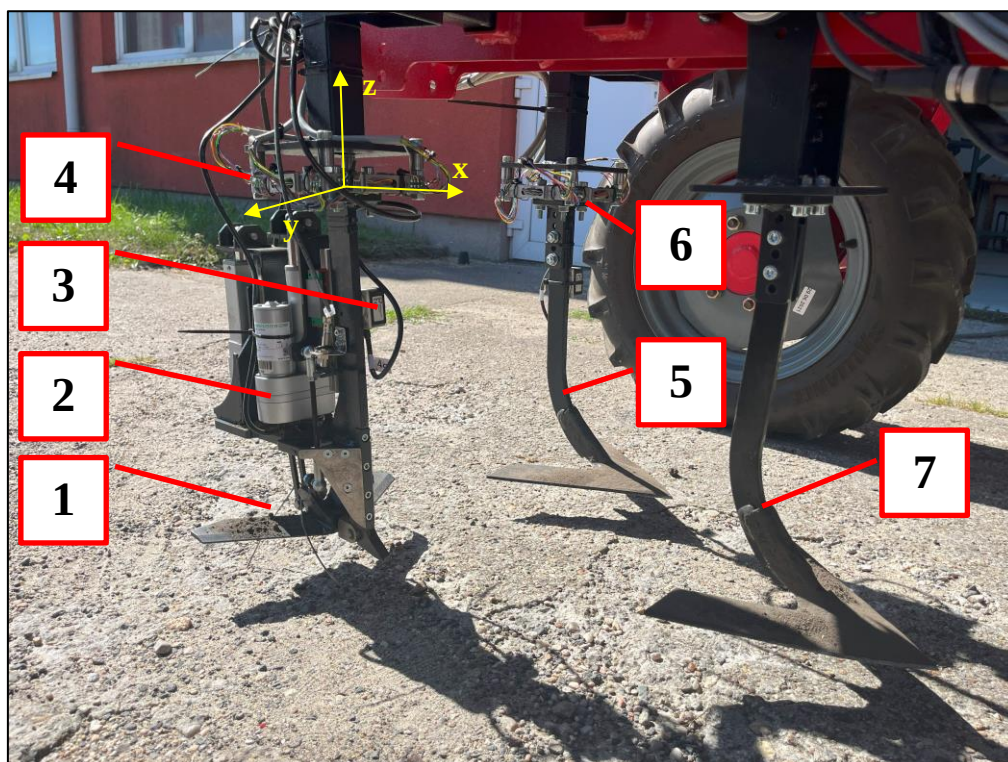
Rys. 7.3. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii zamontowana na pojeździe autonomicznym

Szczegółowa metoda badawcza z objaśnieniami zastosowanych elementów układu sterowania została opisana w następnym rozdziale. Przybliżono szerzej sposób prowadzenia badań polowych.

7.2. Metoda badawcza

Prowadzono serię badań na stanowisku badawczym (rys. 7.4), których głównym celem było zidentyfikowanie obciążeń wstępujących na dwóch narzędziach rolniczych przeznaczonych do pielienia mechanicznego. Badania eksperymentalne były prowadzone na polu badawczym przy użyciu opisanego wcześniej robota autonomicznego z zamontowanymi na mechatronicznej sekcji pielącej dwoma narzędziami: zaprojektowanym w ramach doktoratu z funkcją zmiany kluczowych parametrów geometrycznych oraz w wersji standardowej o tej samej szerokości 260mm, kącie skrawania $\alpha = 13^\circ$ oraz kącie pochylenia ostrzy $\beta = -9^\circ$. Kąty zmierzono wg przyjętego na rys. 5.7 sposobu przy czym jako środek układu współrzędnych przyjęto początek ostrza skrawającego.

Badania prowadzono w dwóch konfiguracjach stanowiska badawczego z trzema narzędziami pielącymi (rys. 7.4) oraz z dwoma (rys. 7.6), co zapewniło bardziej równomierne rozłożenia obciążeń na porównywane narzędzia.



Rys. 7.4. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii zamontowana na pojeździe autonomicznym w konfiguracji z trzema narzędziami

Badania porównawcze obciążeń oraz analizowanie działania mechatronicznej sekcji były możliwe dzięki specjalnie zaprojektowanemu układowi pomiarowemu, którego część elementów zaprezentowano na rys. 7.4. Numerem (1) oznaczono narzędzie o zmiennej geometrii kątów skrawania, (2) to napędy liniowe elektryczne umożliwiające zmianę tych kątów oraz jednocześnie ich rejestrowanie przez sterownik dzięki czujnikom położenia tłoka. Do narzędzi przymocowano akcelerometry do rejestrowania drgań narzędzi (3) w trzech osiach x, y i z, których zakres pomiarowy wynosił 4g. Zostały one zamontowane na tej samej wysokości dla obu porównywanych narzędzi. Elementy (4) i (6) to wieloosiowe czujniki obciążeń, do których przymocowane są odpowiednio: mechatroniczne narzędzie (1) oraz standardowe o tej samej szerokości roboczej (5). Trzecie narzędzie (7) montowane jest w środku geometrycznym sekcji pielącej i ma możliwość łatwego demontażu – zastosowano identyczne narzędzie jak (5).



Rys. 7.5. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca, widok na elementy wykonawcze i pomiarowe

Stanowisko badawcze zgodnie z założeniami zostało wyposażone w napęd liniowy w tym przypadku hydrauliczny (1) do zmiany kąta γ . Encoder absolutny (2) został umieszczony w miejscu umożliwiającym kontrolowanie wspomnianego kąta pochylenia narzędzi (rys. 7.5). Skrzynka elektryczna (3) służy do łączenia sygnałów z czujników oraz wszystkich napędów

elektrycznych ze sterownikiem (5), który przekazuje je do aparatury rejestrującej poprzez sieć CAN. Siłownik elektryczny (4) z możliwością pomiaru położenia tłoka służy do automatycznej zmiany nastaw głębokości pielenia.



Rys. 7.6. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii zamontowana na pojeździe autonomicznym w konfiguracji z dwoma narzędziami

Badany wpływ zmian geometrii mechatronicznego narzędzia oraz narzędzia w wersji standardowej na obciążenia były odnoszone do kluczowego czynnika jakim jest prędkość jazdy robota. W tym celu w środku geometrycznym robota zamontowano antenę GPS oraz odbiornik (rys. 7.7). Elementem wykorzystywanym do rejestracji i przetwarzania sygnałów pomiarowych w trakcie eksperymentalnych badań był mobilny zestaw akwizycji danych (rys. 7.8), w skład którego wchodzi aparatura pomiarowa i oprogramowanie firmy Hottinger, rejestrator CX22- W, wzmacniacze MX840B oraz oprogramowanie Catman. Na potrzeby prowadzonych w ramach doktoratu badań rejestrowano sygnały z częstotliwością 50Hz w jednej podstawie czasowej. Rejestrowane parametry pielenia odniesiono do wyników pomiarów oporu penetracji gleby oraz wilgotności przy użyciu penetrollogera firmy Eijkelkamp z sondą Theta Probe ML2x (rys. 7.9). Urządzenie jest wyposażone w wymienne stożki montowane na dzielonej żerdzi do czujnika z zakresem pomiarowym 1000N z rozdzielczością 1N. Pomiaru dokonywane są zgodnie z zaprogramowanym planem badawczym były zapisywane do pamięci urządzenia, a następnie przetwarzane w dedykowanym oprogramowaniu – w tym przypadku

wykonywano po 5 powtórzeń w okręgu o średnicy 1 m (zgodnie z zaleceniami) dla 3 odrębnych badań na początku, w środku oraz na końcu pola na głębokościach do 40 cm. Jak podaje producent opory penetracji obliczane są przez urządzenie wg następującego wzoru:

$$\text{opór penetracji [MPa]} = \frac{\text{siła [N]}}{\text{powierzchnia stożka [cm}^2\text{]} \cdot 100} \quad 7.1$$

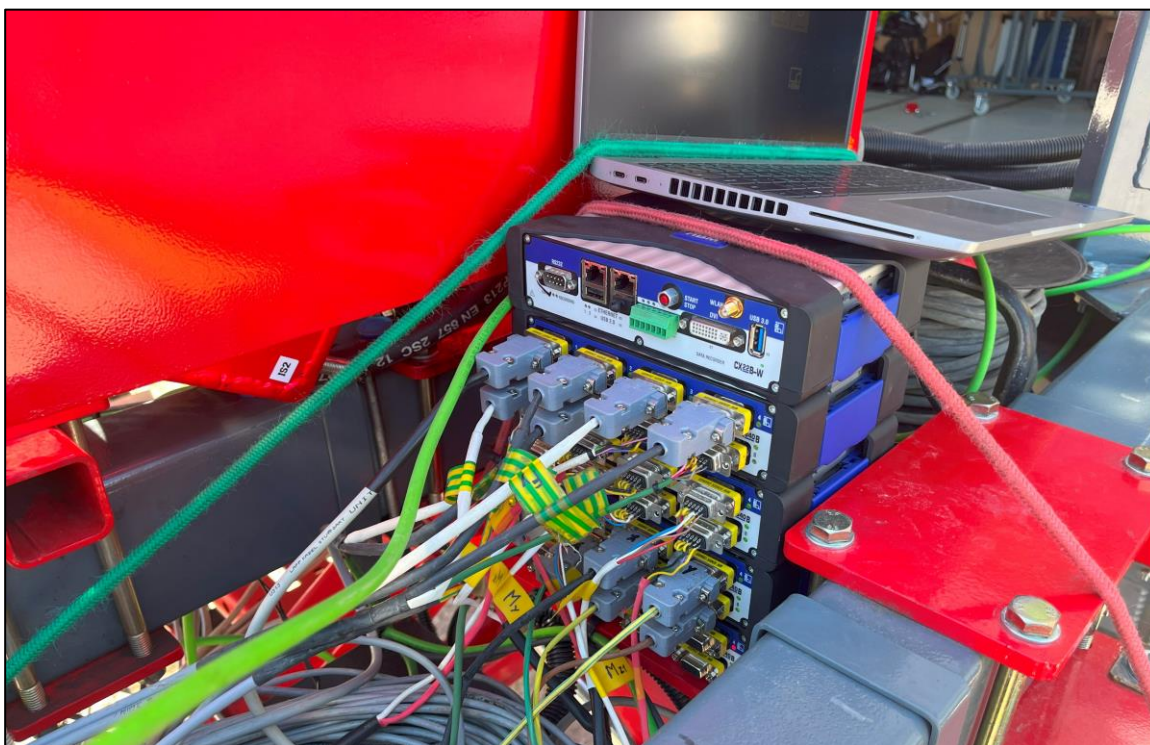


Rys. 7.7. Antena GPS zamontowana w środku geometrycznym autonomicznego robota

Testy polowe prowadzono na polu badawczym Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego przy użyciu robota polowego, z prędkościami maksymalnymi do 10 km/h. Z uwagi na ograniczenia napędów robota stabilne odczyty prędkości jazdy uzyskiwano maksymalnie dla 8 km/h. Łącznie przeprowadzono około 60 pomiarów dla różnych przypadków.

Badania polowe były przeprowadzane według opracowanej procedury. W pierwszej kolejności dokonano pomiarów oporów penetracji gleby z połączonymi badaniami wilgotności gleby. Po zasileniu układu wykonawczo-pomiarowego ustawiano parametry pracy urządzenia dla danej próby: nastawiano głębokość pielenia, kąt skrawania narzędzia α oraz kąt pochylenia ostrzy skrawających β . Kolejnym krokiem było wytarowanie wskazań czujników, w szczególności mostków tensometrycznych dla obu czujników pomiarowych. W momencie ustawienia robota polowego wzdłuż toru jazdy na polu badawczym rozpoczynano rejestrację wszystkich wymienianych wcześniej sygnałów w jednej podstawie czasu. Następnie opuszczano uchwyt TUZ robota i rozpoczynano jazdę z zadaną dla danego testu prędkością wprowadzając poprawki do trajektorii jazdy. Obsługa robota odbywała się manualnie

z poziomu pulpitu sterującego. Po przejechaniu zaplanowanej odległości na polu badawczym podnoszono TUZ wraz z sekcją oraz po pewnym czasie zatrzymywano pomiar. Badania były prowadzone dla zmiennych prędkości jazdy średnio od 2 do 8 km/h. Głównie przy głębokości pielenia 30mm z uwagi na specyficzne warunki glebowe na polu testowym (niska wilgotność i wysoka zwężłość) oraz zmiennych kątach α i β .



Rys. 7.8. Mobilny zestaw akwizycji danych z rejestratorem CX22-W oraz wzmacniaczami MX840B

Zarejestrowane przez aparaturę (rys. 7.8) wyniki były następnie przenoszone do komputera, gdzie przy użyciu oprogramowania Octave poszczególne sygnały były interpretowane i wizualizowane w postaci wykresów. Aparatura rejestrująca dzięki zastosowaniu odpowiednich modułów pełniła także rolę wzmacniacza dla wszystkich analizowanych mostków tensometrycznych.

7.3. Badania właściwości gleby

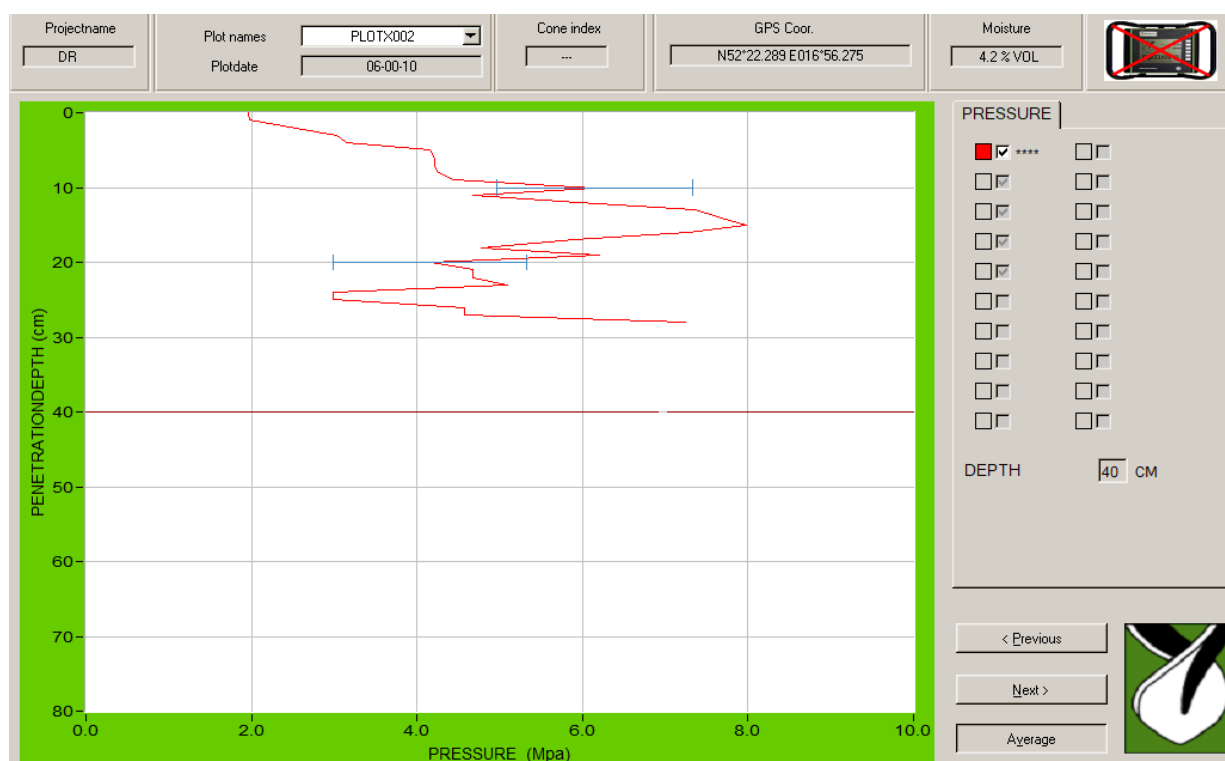
Badania polowe według przyjętej metodyki badawczej rozpoczęto od sprawdzenia oporów penetracji gleby oraz wilgotności przy użyciu wspomnianej aparatury. Powierzchnia gleby pokryta była dużą ilością sypkiego piasku stąd pomiar głębokości penetracji odbywał się z niewielkim opóźnieniem. Badania prowadzono w czasie wysokich temperatur, około 30°C. Średnia zarejestrowana wilgotność gleby dla trzech badań wyniosły odpowiednio: 4,2%, 5% oraz 4,8% (rys. 7.10, rys. 7.11, rys. 7.12). Sonda do pomiaru wilgotności była umieszczana w niewielkiej odległości od żerdzi penetrollogera (rys. 7.9).



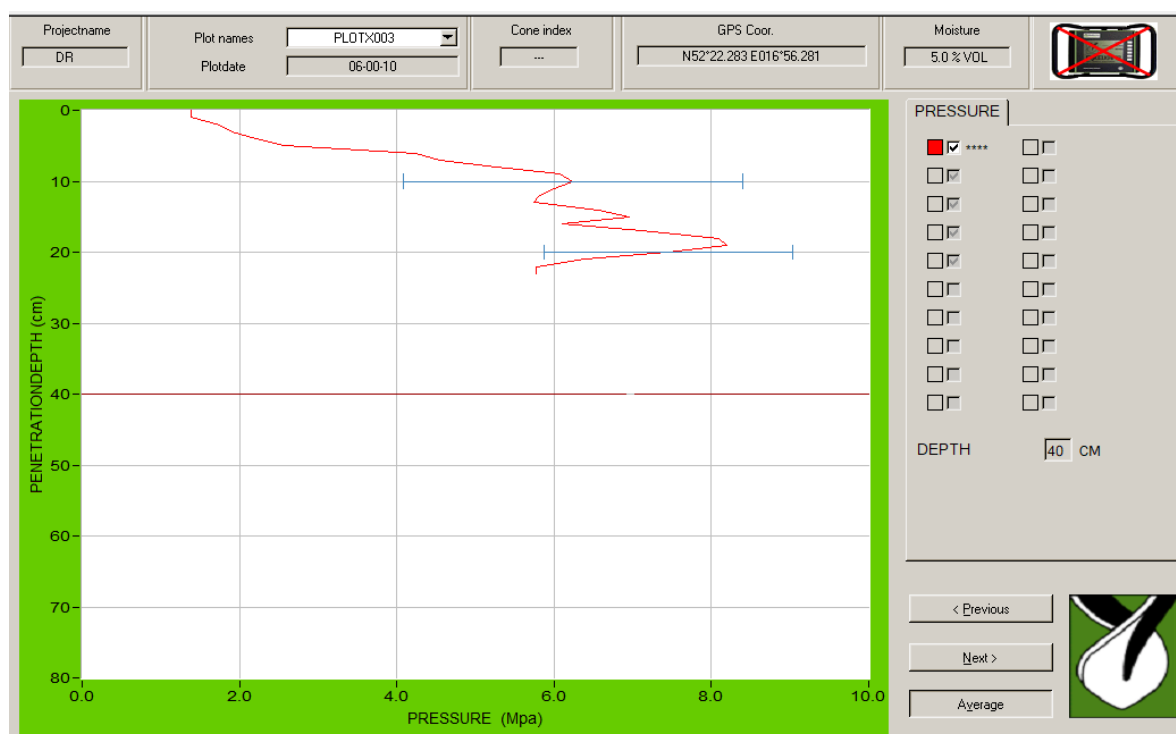
Rys. 7.9. Penetrologger firmy Eijkelkamp do pomiaru oporów penetracji gleby oraz wilgotności w czasie badań na polu badawczym

Uzyskano następujące zakresy oporów penetracji gleby odpowiednio dla początku, środka oraz końca pola pomiarowego dla głębokości pielenia 5 cm: 2 – 4 MPa (rys. 7.10); 1,5 – 4 MPa (rys. 7.11); 1,5 – 2,5 MPa (rys. 7.12). Dla większych głębokości, powyżej 5 cm, uzyskano identyczny zakres oporów 4 – 8 MPa. Jak podaje producent wartości oporów powyżej 0,6 MPa świadczą o jej dużej nośności oraz niskiej zawartości cząstek organicznych. Powołując się na badania Schothorsta z 1968 roku, które koncentrowały się na relacjach między mechaniką gleby, jej

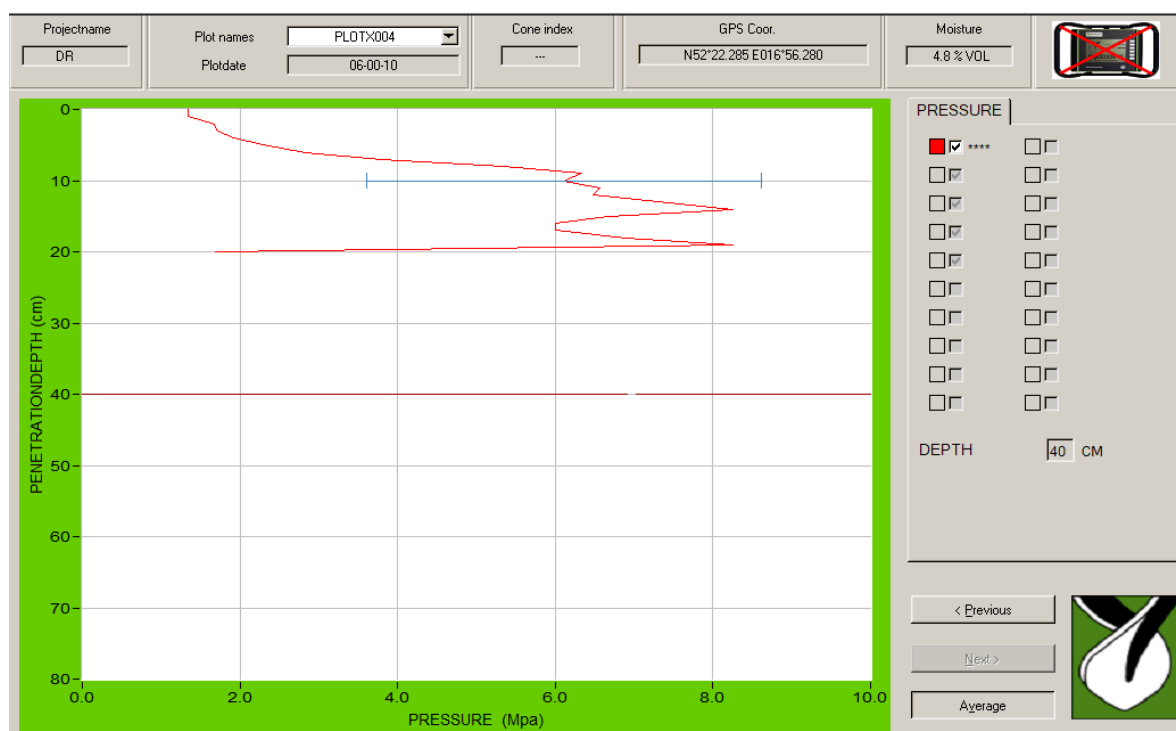
gęstością i zawartością materii organicznej. Zgodnie z przytaczanymi przez producenta aparatury badaniami, przy określonej wilgotności gleby (pF 2), zawartość materii organicznej ma istotny wpływ na opór penetracji. Pozwala to zatem wywnioskować, że wyższa zawartość materii organicznej zazwyczaj prowadzi do zmniejszenia oporu, ponieważ gleba jest bardziej porowata i elastyczna.



Rys. 7.10. Wyniki pomiarów oporu penetracji gleby oraz wilgotności w początkowej części pola badawczego



Rys. 7.11. Wyniki pomiarów oporu penetracji gleby oraz wilgotności w środkowej części pola badawczego

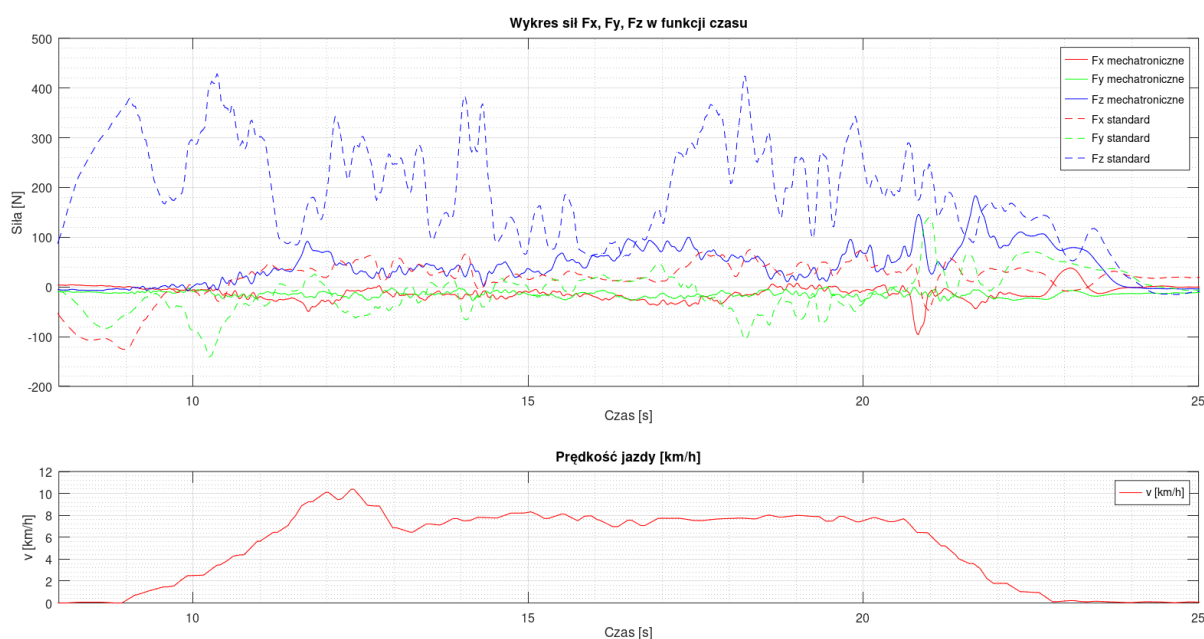


Rys. 7.12. Wyniki pomiarów oporu penetracji gleby oraz wilgotności w końcowej części pola badawczego

7.4. Obciążenia narzędzi w funkcji czasu

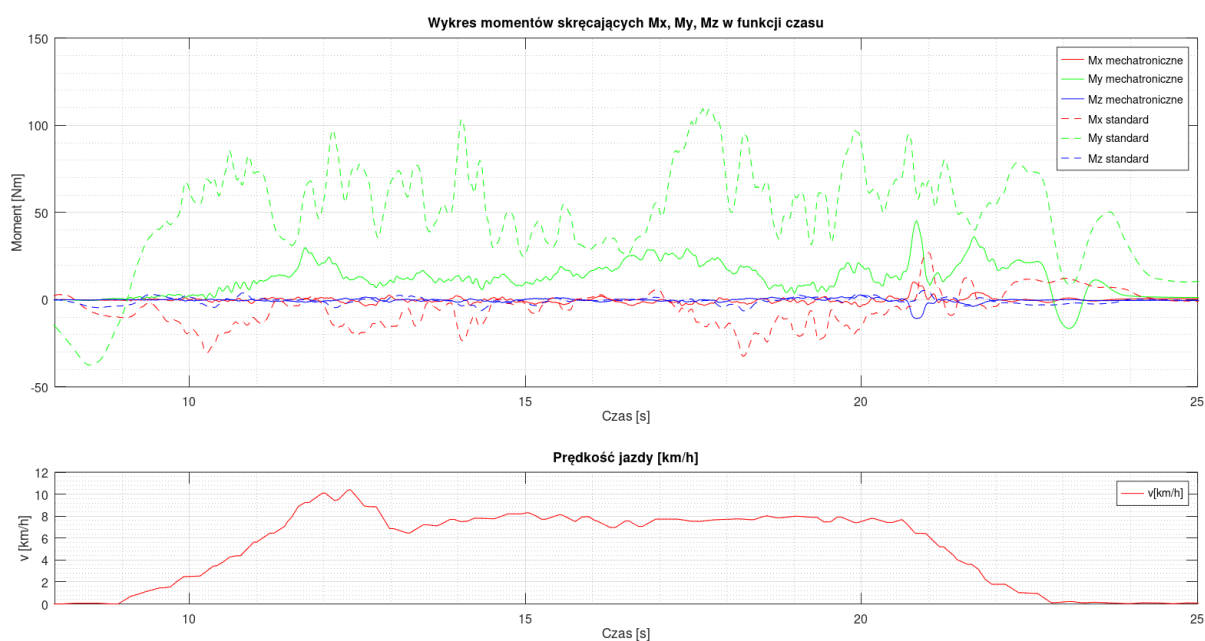
Prezentowane w rozdziale wyniki badań eksperymentalnych wizualizują wszystkie rejestrowane parametry w tym samym czasie, dla każdego z założonych kierunków pomiarowych. Wyniki dotyczą prób realizowanych dla zidentyfikowanych najlepszych nastaw kątów pod warunki glebowe występujące na polu badawczym. Badania prowadzono dla następujących nastaw elementów skrawających tzn. $\alpha = 1,1^\circ$ oraz $\beta = 0,8^\circ$. W rozdziale przytoczono jedynie wybrane przebiegi z uwagi na znaczną ilość materiału pozostałe wyniki zestawiono w formie tabel oraz innych wykresów np. zależności obciążeń od badanych kątów narzędzia. Każdy pomiar ma nadany numer próby, który jest spójny w całym dokumencie.

Analizom poddawano jedynie wycinki przebiegów, których jako początek analizy przyjęto chwilę przed rozpoczęciem ruchu przez pojazd stąd wykresy sił i momentów są odniesione zawsze do prędkości jazdy. Analogicznie jako koniec analizy przyjmowano chwilę po zakończeniu ruchu – czas ten był zależny od charakteru zarejestrowanego urządzenia. Jeśli siły chwilę po zatrzymaniu pojazdu zbiegały się blisko zera to jako koniec analizy przyjmowano właśnie ten moment. W przypadkach kiedy obciążenia nie zbiegały się do zera na skutek np. nadmiernego zebrania chwastów, jako koniec analizy przyjmowano przebieg kończący się sekundę po zatrzymaniu. Podjęto taką decyzję z uwagi na możliwie jak najmniejszy wpływ obciążeń zarejestrowanych w czasie postoju maszyny.



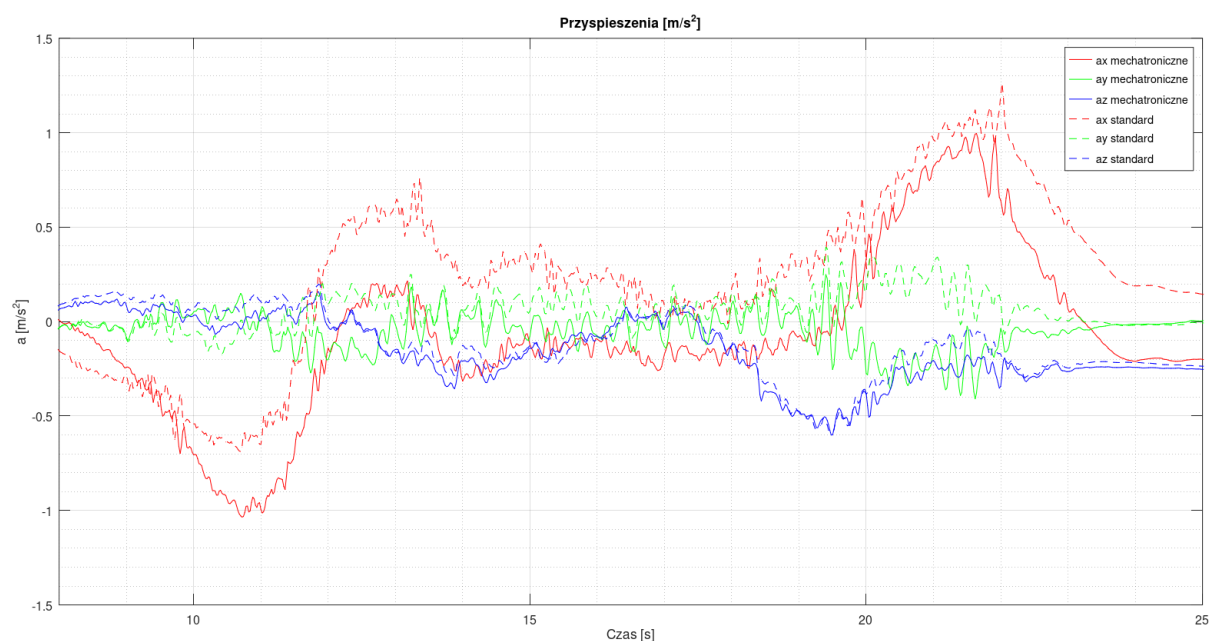
Rys. 7.13. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 2

W celu lepszego znajdowania zależności pomiędzy sygnałami oraz lepszego interpretowania ich, sygnały zostały uśrednione średnią ruchomą z 10 próbek – wskaźniki natomiast były obliczane dla surowych sygnałów. Analizując rys. 7.13 od 8 do 12 sekundy przebiegu widoczny jest znaczny wzrost siły F_z w narzędziu standardowym. Jest to moment opuszczenia TUZ robota oraz efekt przenoszenia części obciążenia od sekcji przez narzędzie – koło podporowe dopiero po osiągnięciu stabilnej prędkości jazdy zaczyna przenosić większość obciążenia. Narzędzie mechatroniczne dzięki dobranym doświadczalnie ustawieniom kątów skrawania oraz dzięki zastosowaniu wymiennego dłuta od czoła, umożliwiono łatwiejsze zagłębienie się w glebie. W następstwie koło podporowe sekcji oraz narzędzie standardowe przenoszą obciążenia od masy urządzenia. Dla analizowanego przypadku od 12 do 20 sekundy rejestrowany jest przebieg w czasie normalnej pracy narzędzi po osiągnięciu zakładanej głębokości pielenia oraz prędkości jazdy. Wszelkie rejestrowane wahania wynikają ze znacznego zagęszczenia gleby, przeszkód znajdujących się w glebie w tym dużej ilości kamieni oraz sporadycznie korzeni. W przypadku zarejestrowanych składowych sił widać, że w obu przypadkach najbardziej na obciążenie wpływa składowa F_z . Powyżej 20 sekundy następuje wyhamowanie pojazdu oraz podniesienie TUZ, które sprowadzało obciążenia blisko zera – czasami na narzędziach pozostawały resztki nagromadzonych chwastów oraz gleba.



Rys. 7.14. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 2

W przypadku momentów skręcających (rys. 7.14) najbardziej znaczącą z punktu widzenia analiz porównawczych obciążeń jest składowa M_y – moment skręcający wynikający z kierunku jazdy. Na jego wartości wpływają siły potrzebne do skrawania gleby, opory wynikające z podcinania chwastów oraz po części siły od masy sekcji powodujące skręcanie się narzędzi w osi „y”. Jest to widoczne na przebiegu do 12 sekundy, gdzie rozpoczyna się właściwe pienie. Na pozostałe składowe momentów duży wpływ ma trajektoria jazdy robota. W czasie prowadzonych badań unikano dokonywania ostrych zakrętów jednak momentami konieczne było wprowadzanie poprawek do toru jazdy, co jest widoczne na przebiegach jako chwilowy wzrost momentów.



Rys. 7.15. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 2

Oba narzędzia zostały wyposażone w czujniki przyspieszeń, których głównym celem było uwiarygodnienie prowadzonych testów poprzez rejestrowanie dynamicznych obciążeń i wibracji w trakcie pracy. Dodatkowo dane pozwalają na prowadzenie dalszych analiz na podstawie zebranych charakterystyk narzędzi sztywno zamocowanych na sekcji. Dla opisywanego przypadku (rys. 7.15) widoczne jest, że oba narzędzia zachowują się w podobny sposób w czasie pracy – jest to między innymi potwierdzenie, że warunki pracy dla obu narzędzi były bardzo zbliżone. Różnice w wielkości rejestrowanych przyspieszeń dla narzędzia

mechatronicznego wynikają poniekąd właśnie z faktu generowania mniejszych obciążeń w czasie pracy oraz stabilniejszego przebiegu pielenia.



Rys. 7.16. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 3

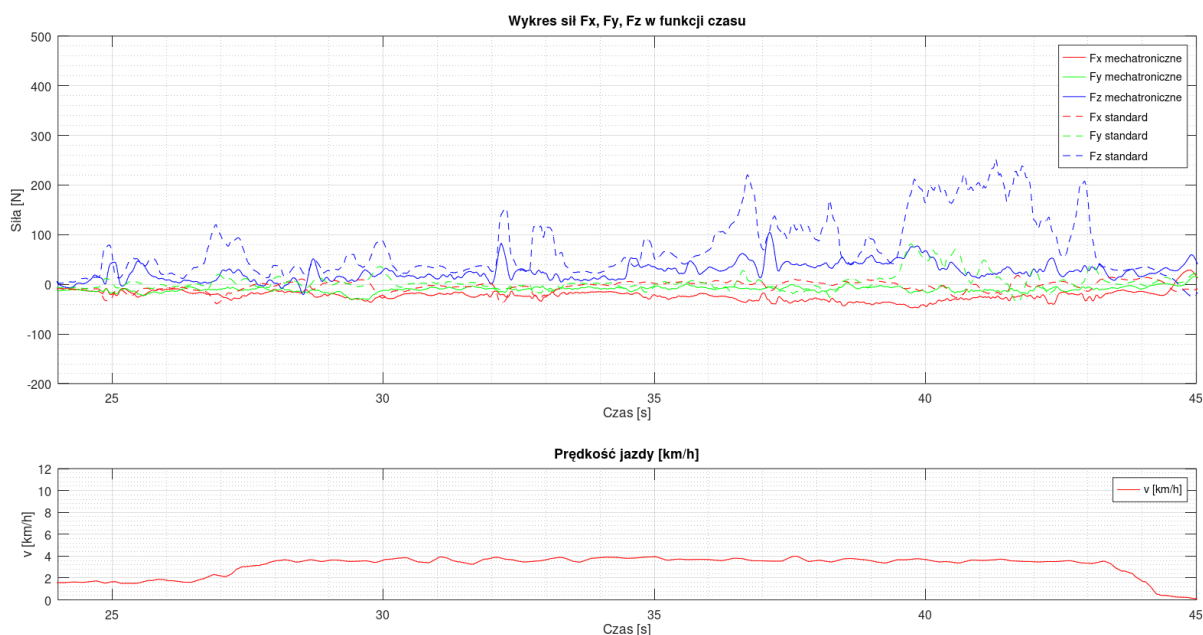


Rys. 7.17. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 3

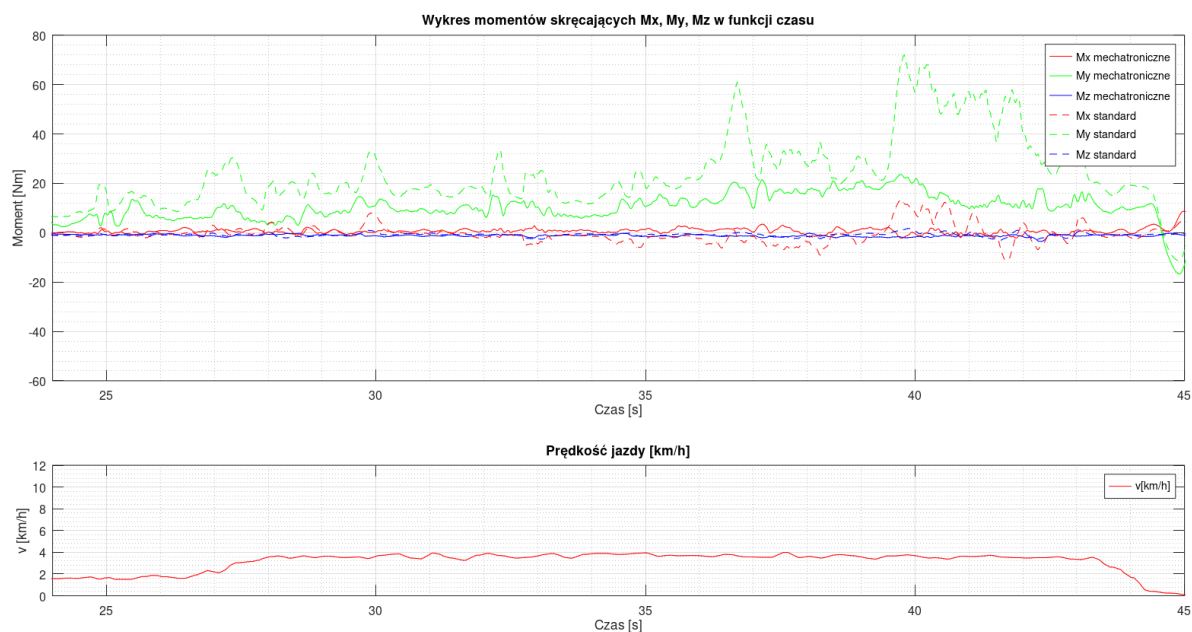


Rys. 7.18. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 3

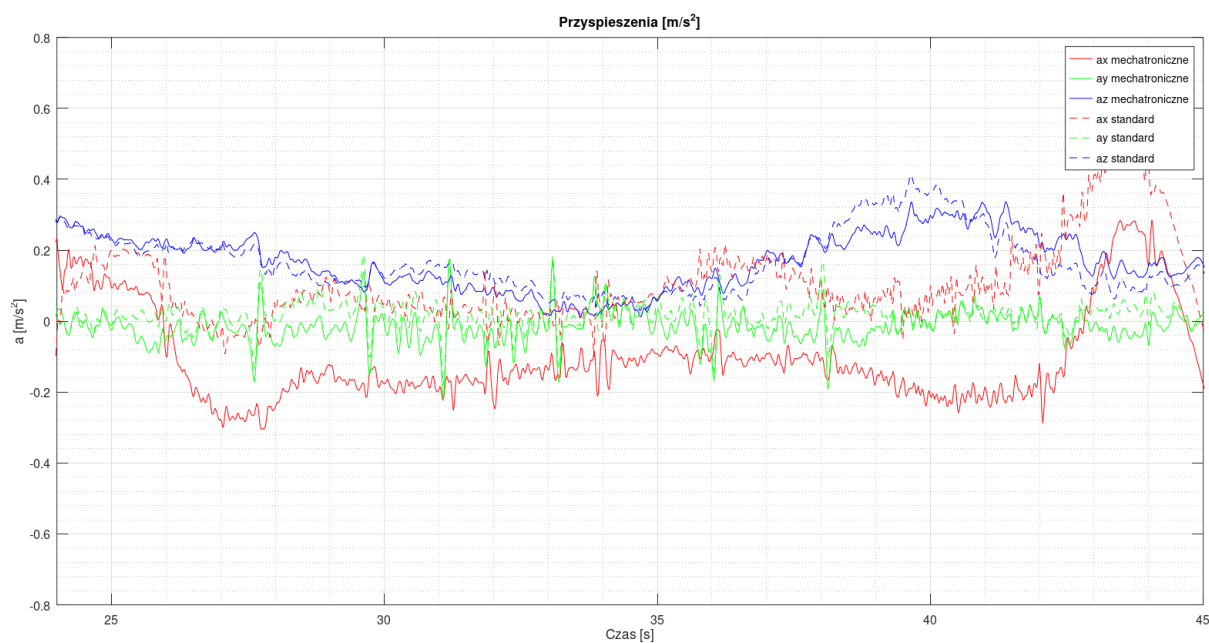
Analogicznie obserwacje jak dla opisanych badań wykonanych w próbie 2 można zaobserwować na wykresach próby 3 (rys. 7.16, rys. 7.17, rys. 7.18). Widoczne są znaczne różnice w zarejestrowanych zarówno siłach jak i momentach przy bardzo zbliżonych wartościach przyspieszeń. Jest to jedna z prób wykonywanych przy maksymalnej dla używanego robota prędkości pielenia.



Rys. 7.19. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 4



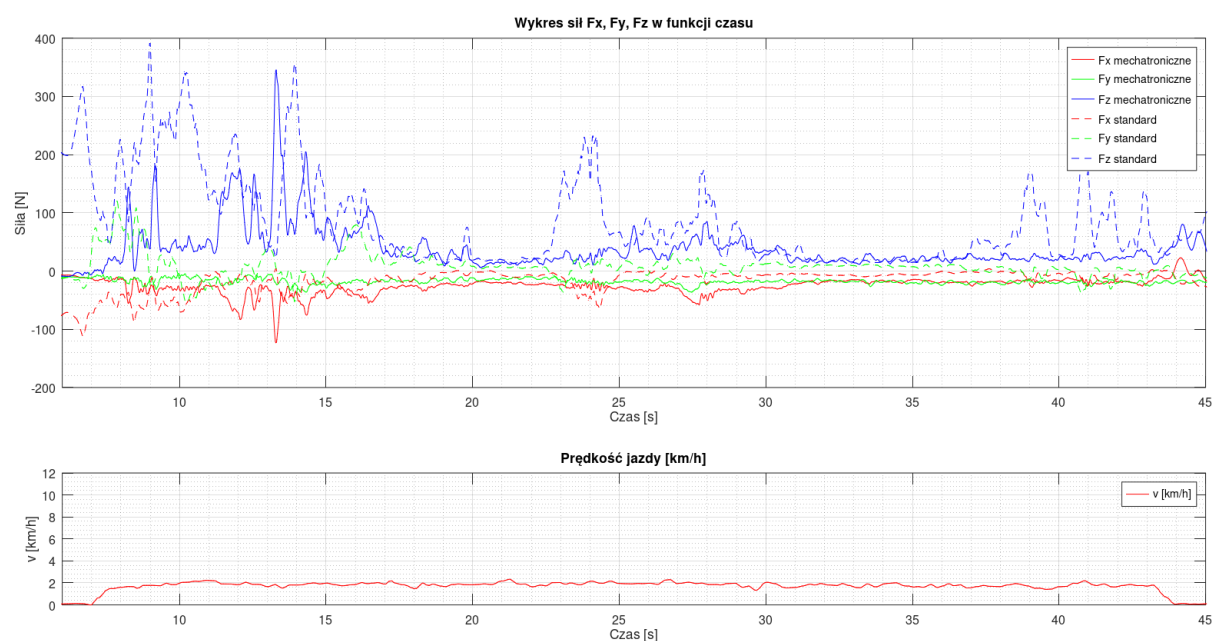
Rys. 7.20. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 4



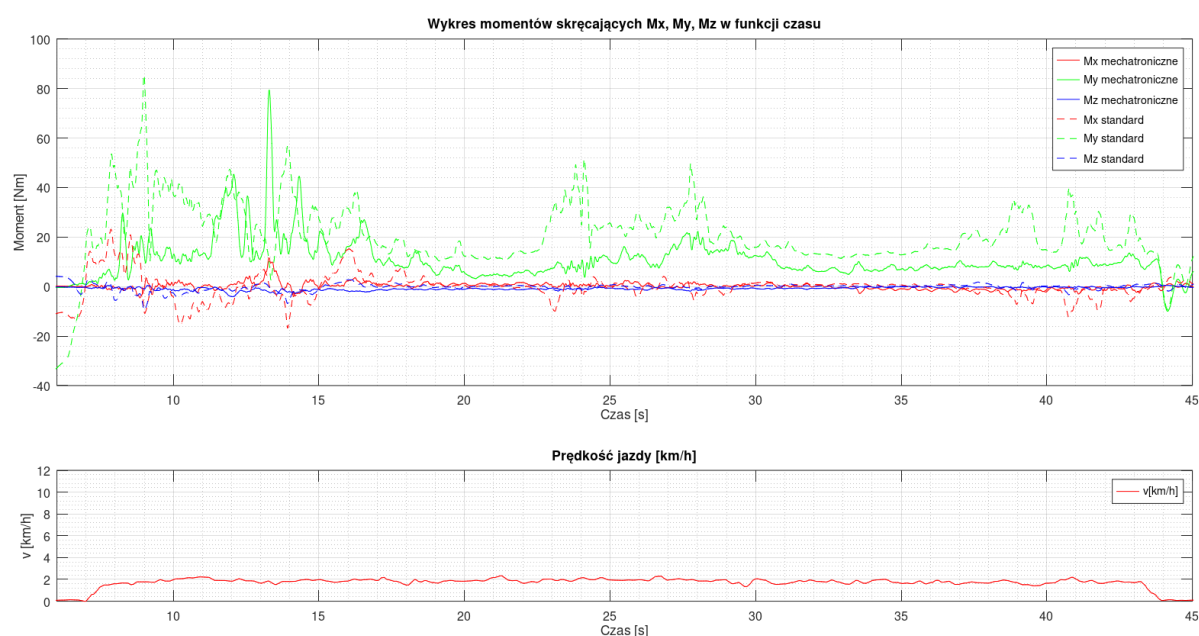
Rys. 7.21. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 4

W przypadku badań prowadzonych dla niższych prędkości jazdy (rys. 7.19, rys. 7.20, rys. 7.21) tzn. około 4 km/h różnice sił i momentów generowanych na narzędziach są znacznie mniej zauważalne, a charakterystyki mają znacznie mniej fluktuacji. Zarejestrowane drgania

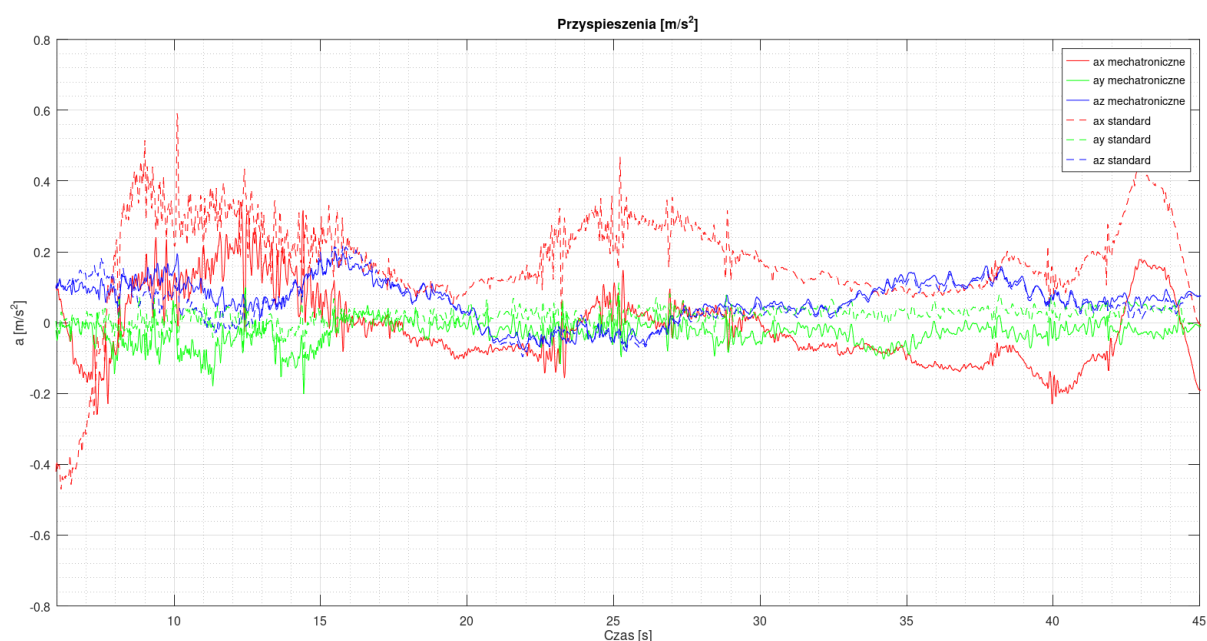
narzędzi znów mają podobne przebiegi z tym, że narzędzie mechatroniczne generowało większe drgania w kierunku „x” w czasie uzyskania stabilnej prędkości jazdy.



Rys. 7.22. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 5



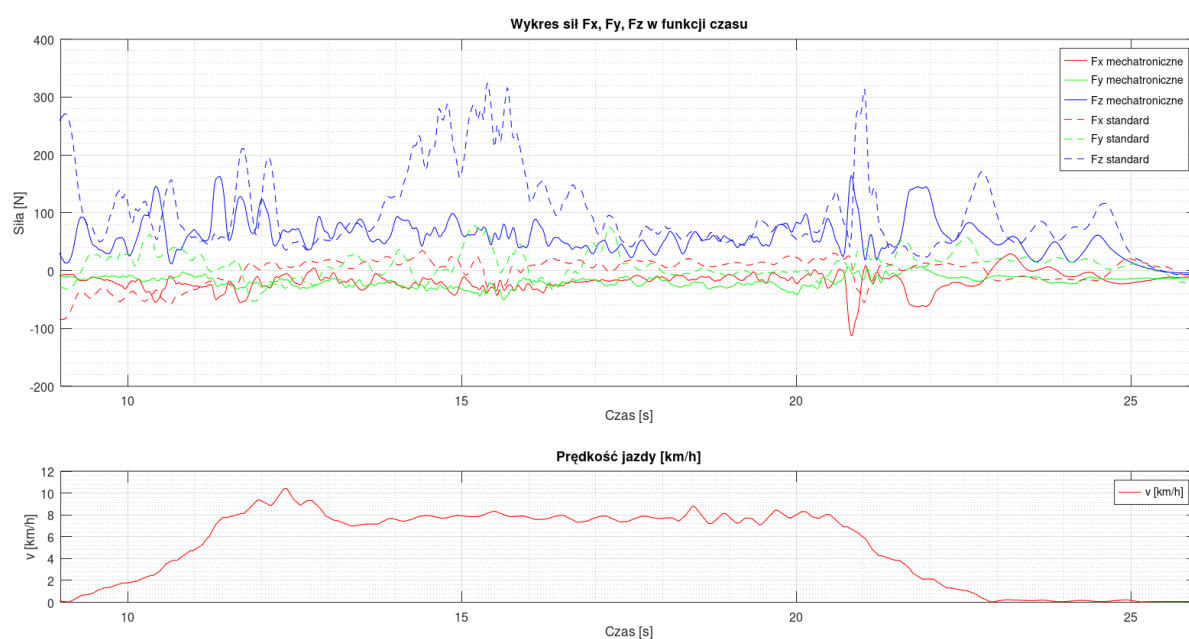
Rys. 7.23. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 5



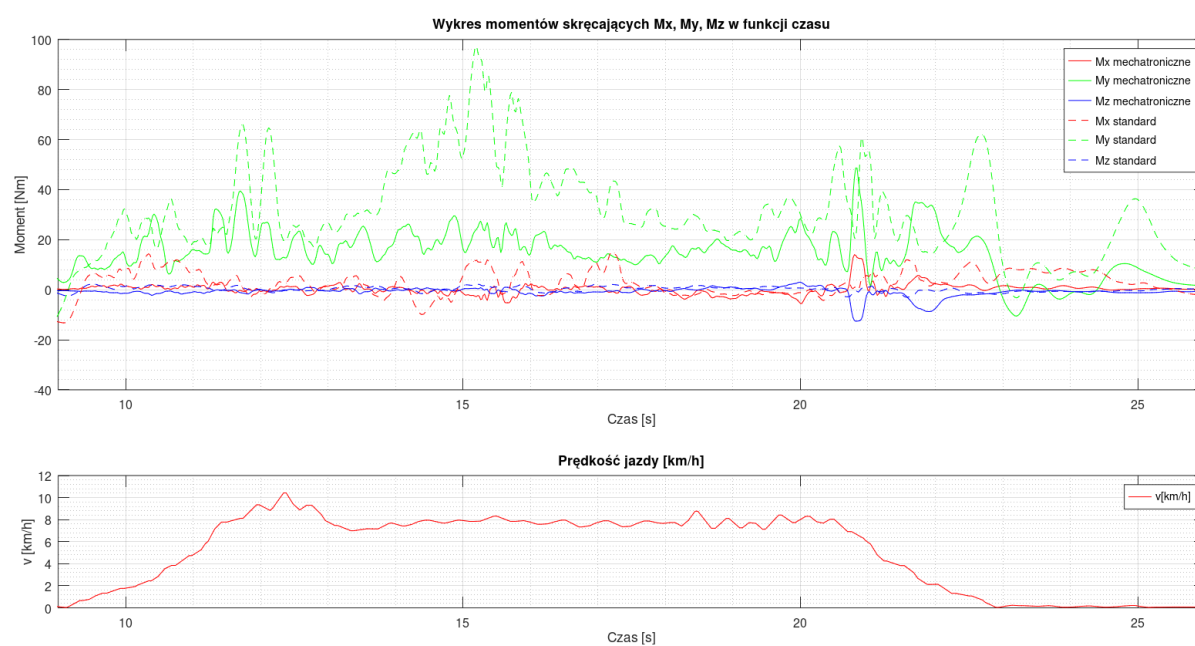
Rys. 7.24. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 5

Próba 5 (rys. 7.22, rys. 7.23, rys. 7.24) została przeprowadzona dla prędkości jazdy około 2 km/h. Różnice w generowanych przez oba narzędzia obciążeniach są również znacznie mniej zauważalne jak dla prędkości powyżej 4 km/h. W przypadku sił, charakterystyki praktycznie pokrywają się z zauważalnymi chwilowymi wzrostami siły F_z . Różnice w wielkości charakterystyk obciążeń są lepiej zauważalne dla momentów skręcających – w szczególności dla momentu skręcającego M_y . W przypadku narzędzia mechatronicznego część przebiegu charakteryzuje się dużą równomiernością co może świadczyć również o dobrym utrzymywaniu równomiernej głębokości pielenia. W przypadku próby 5 większe poziomy drgań zarejestrowano dla narzędzia standardowego.

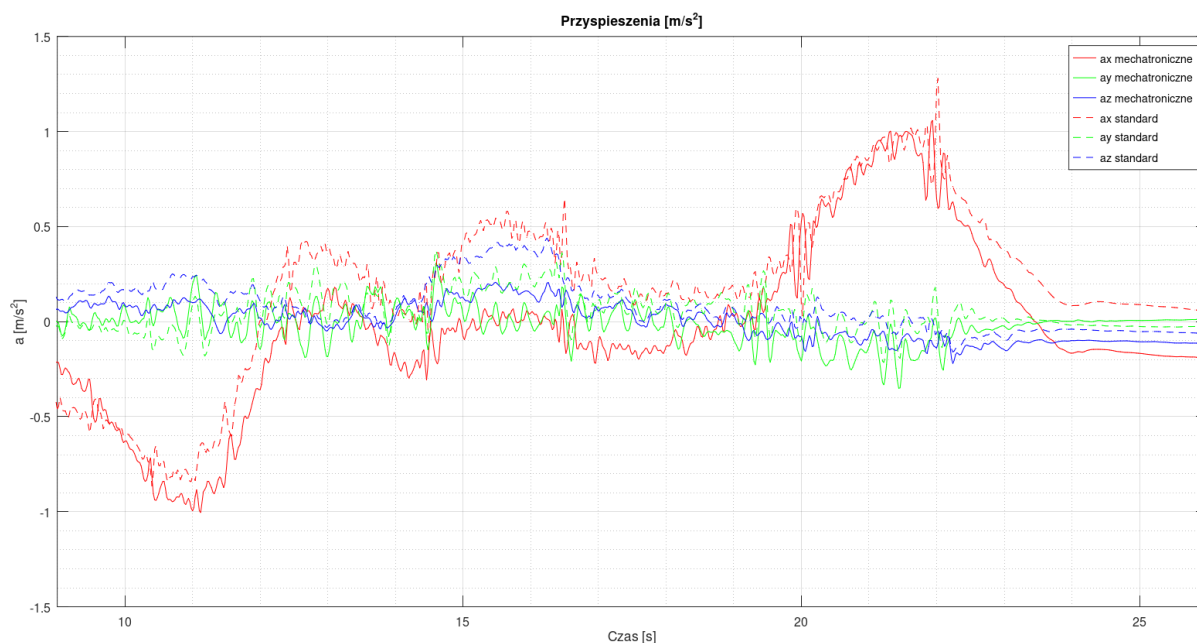
Jako ostatni przykład przytoczono próbę numer 6 (rys. 7.25, rys. 7.26, rys. 7.27), która była prowadzona dla prędkości jazdy 8 km/h, gdzie zauważalny jest na początku skok do 10 km/h – wpłynął on głównie na wielkość zarejestrowanych momentów skręcających M_y . Uzyskane charakterystyki obciążeń są bardziej równomierne dla narzędzia mechatronicznego, a przyspieszenia zarejestrowane na obu narzędziach są bardzo zbliżone, narzędzia zatem pracowały na bardzo podobnych warunkach glebowych i można przypuszczać, że nic nie zakłócało ich pracy w czasie pielenia.



Rys. 7.25. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 6



Rys. 7.26. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 6

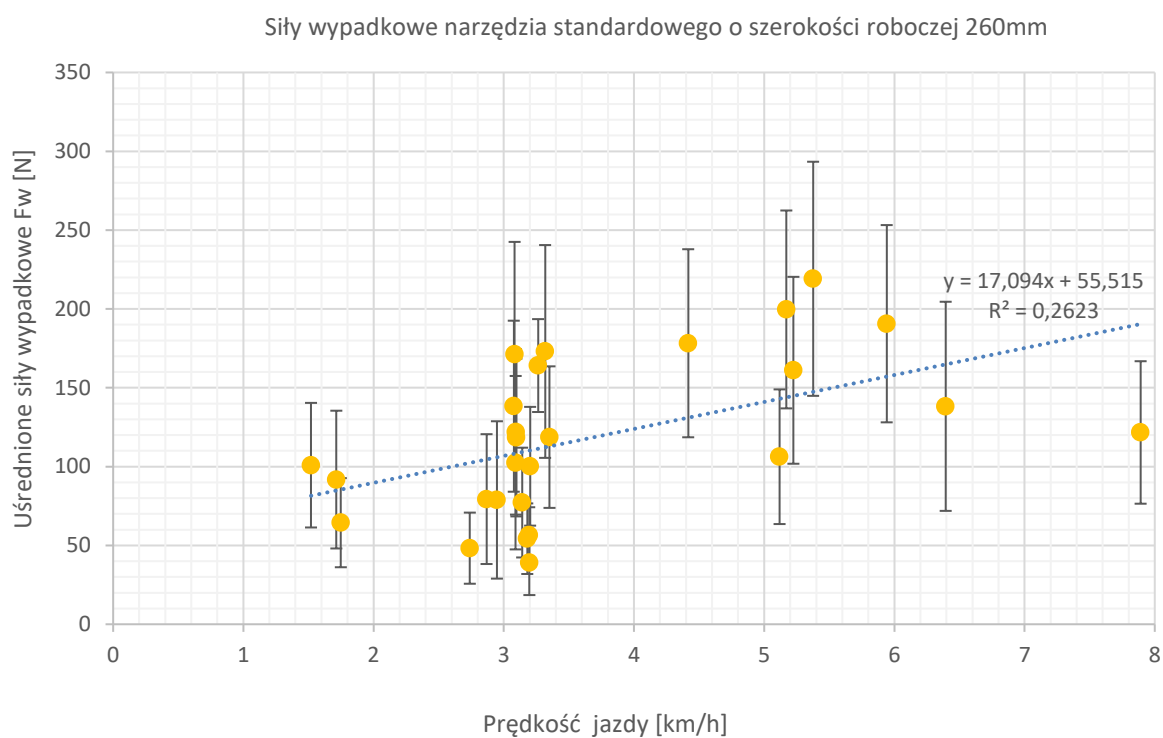


Rys. 7.27. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 6

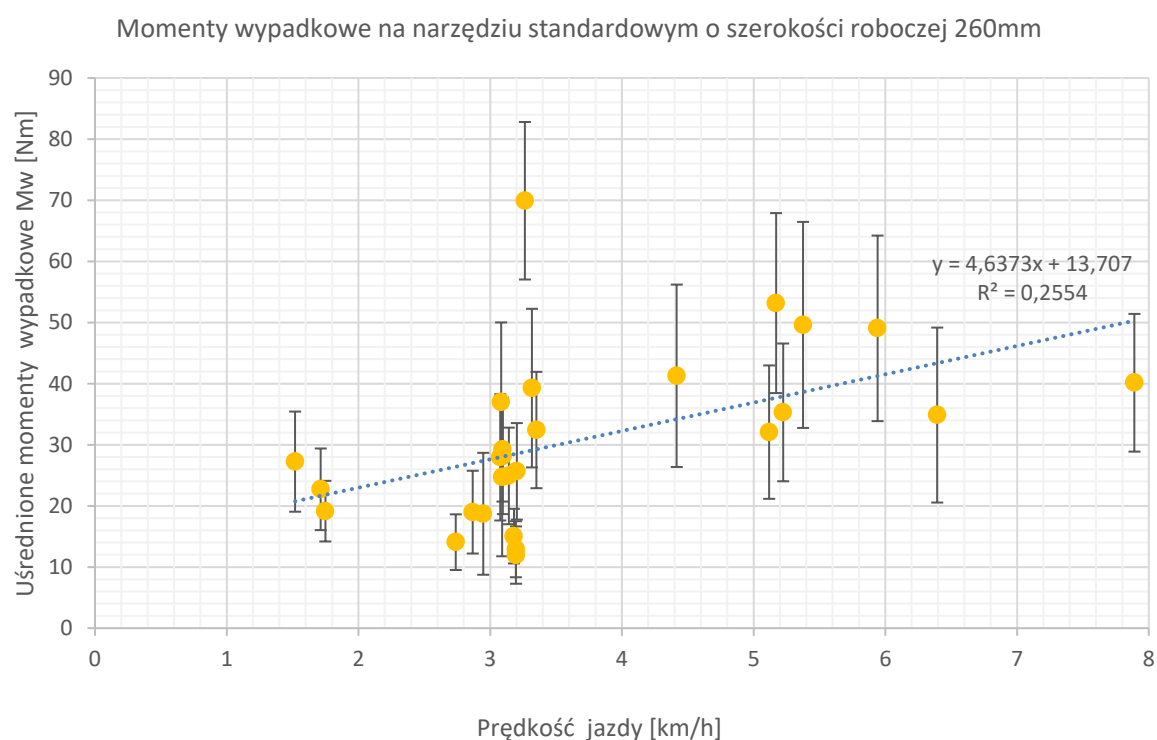
7.5. Obciążenia w funkcji prędkości jazdy

Prędkość jazdy jest jednym z głównych czynników wpływających na wielkości generowanych przez narzędzia oporów. W rozdziale na podstawie zebranych danych wyprowadzono wspomniane zależności. Łącznie dla standardowego narzędzia zarejestrowano 26 prób. Dane z rozdziału 7.4 posłużyły do obliczenia uśrednionych sił wypadkowych oraz uśrednionych momentów wypadkowych, które zostały zaprezentowane na wykresach w funkcji uśrednionej dla każdej z prób prędkości jazdy. Dla każdej próby obliczono wartości odchyleń standardowych.

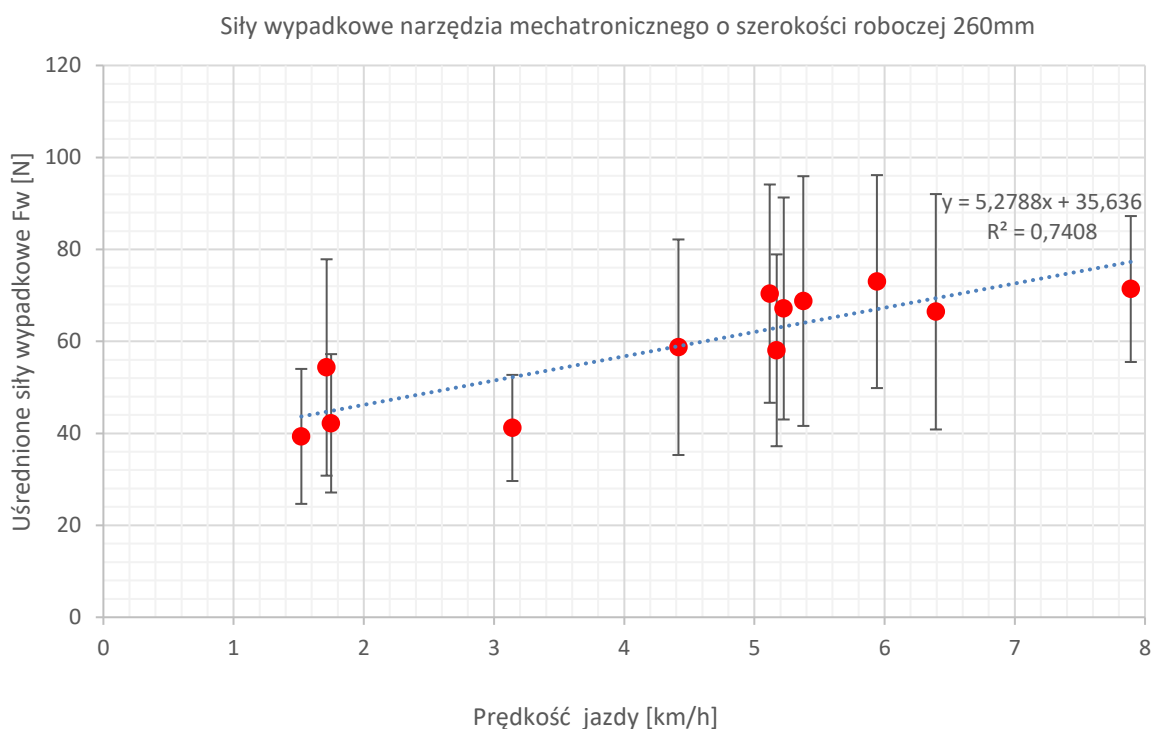
Uzyskane wyniki (rys. 7.28 i rys. 7.29) cechują się podobną zmiennością, których wielkości zależą również od prędkości jazdy. Na podstawie zaprezentowanych na wykresach średnich obciążeniach wypadkowych wyznaczono linie trendu, która pozwala w przybliżony sposób obliczać obciążenia narzędzi w zależności od przewidywanej prędkości jazdy. To z kolei pozwala obliczyć szacunkowe zapotrzebowanie na moc oraz wielkość magazynów energii dla pojazdów autonomicznych lub ciągników w celu dobrania parametrów maszyn pod zakładany areal pól.



Rys. 7.28. Uśrednione siły wypadkowe narzędzia standardowego w funkcji prędkości

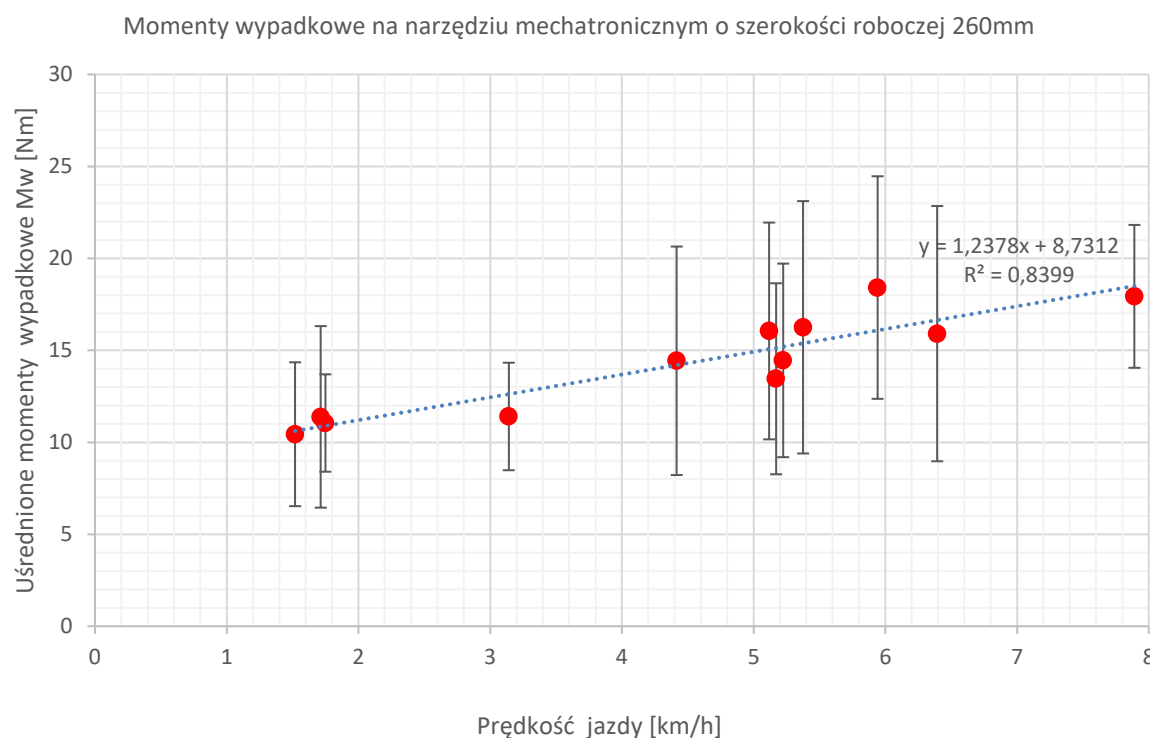


Rys. 7.29. Uśrednione momenty wypadkowe narzędzia standardowego w funkcji prędkości



Rys. 7.30. Uśrednione siły wypadkowe narzędzia mechatronicznego w funkcji prędkości dla kątów: $\alpha = 1,1^\circ$ oraz $\beta = 0,8^\circ$

Analogicznie jak dla narzędzia standardowego sporządzono wykresy uśrednionych obciążeń narzędzia mechatronicznego (rys. 7.30 i rys. 7.31) dla wyznaczonych kątów elementów skrawających narzędzia, które generowały najmniejsze obciążenia. Dla tych ustawień wykonano 12 prób przy różnych prędkościach jazdy. Jak widać wyznaczone linie trendu mają podobne nachylenie jak dla narzędzia standardowego, zawierają się one jednak w mniejszych poziomach obciążeń – zarówno sił jak i momentów wypadkowych. Rozrzuty uśrednionych obciążeń są również mniejsze, co świadczy o bardziej równomiernej pracy narzędzia mechatronicznego na poszczególnych prędkościach jazdy. Wyznaczone punkty mają również bardziej liniowy przyrost w porównaniu do obciążeń narzędzia standardowego, których rozrzut od linii trendu jest większy.

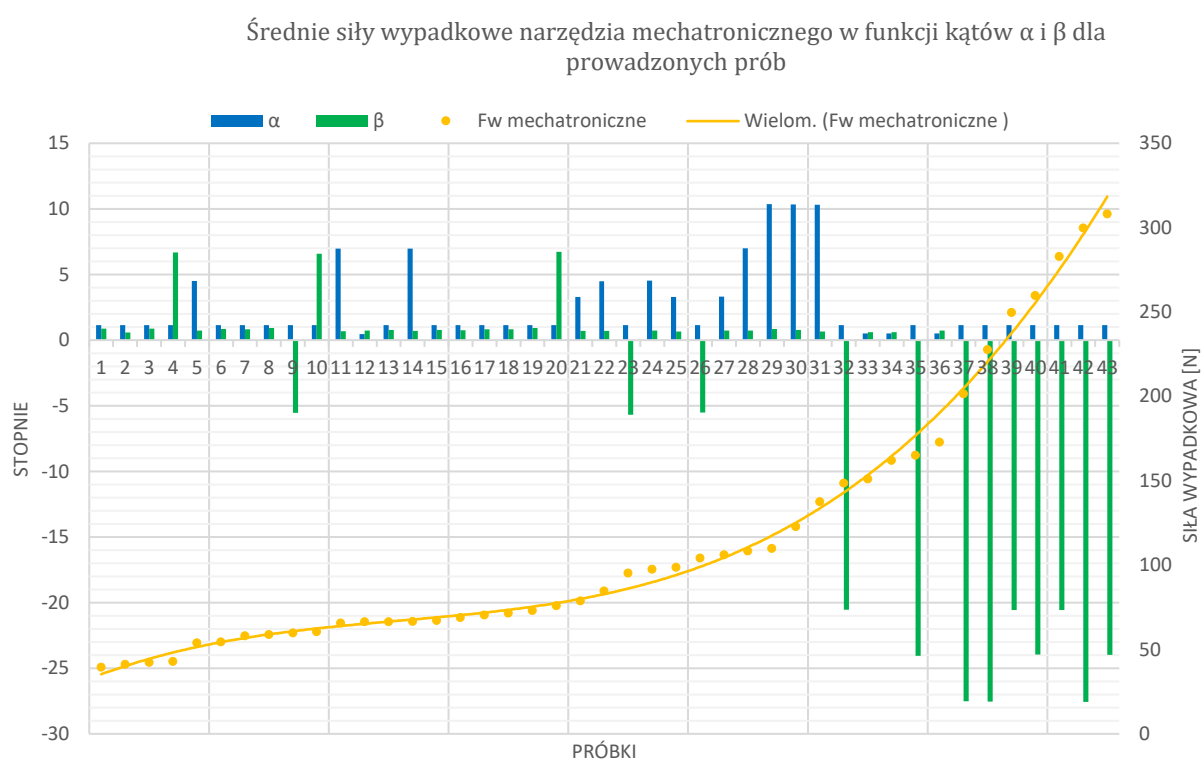


Rys. 7.31. Uśrednione momenty wypadkowe narzędzia mechatronicznego w funkcji prędkości dla kątów: $\alpha = 1,1^\circ$ oraz $\beta = 0,8^\circ$

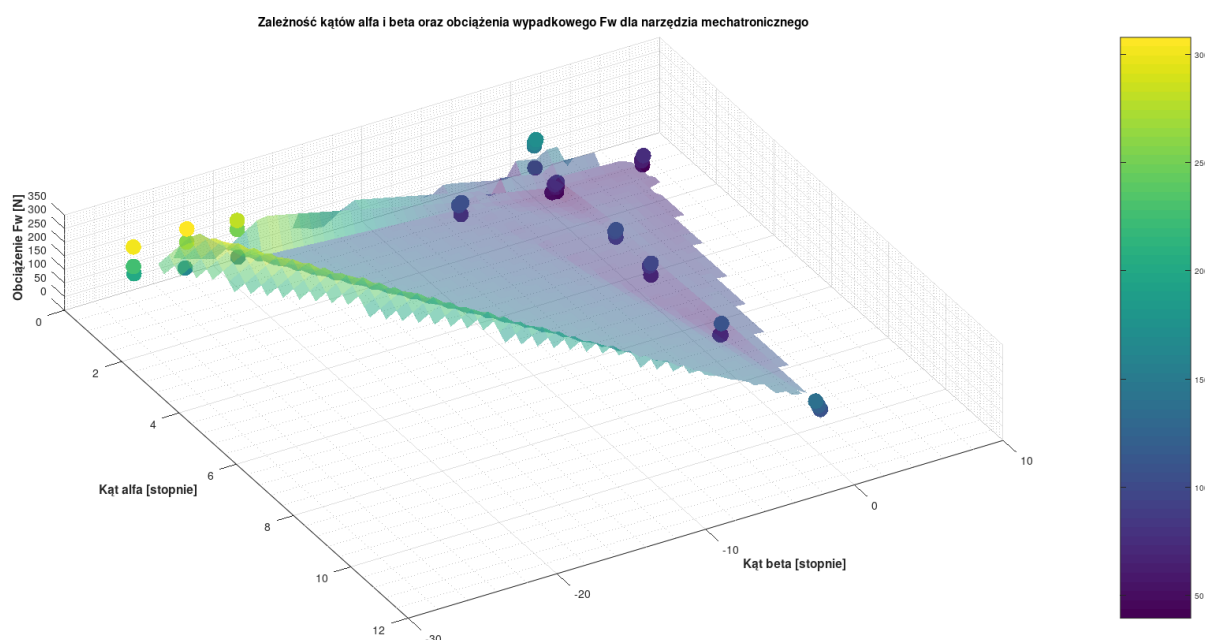
7.6. Obciążenie w funkcji kątów narzędzia mechatronicznego

Prowadzone badania eksperymentalne miały na celu znalezienie ustawień kątów elementów skrawających glebę, które pozwolą uzyskać zgodnie z założoną hipotezą badawczą co najmniej 10% zmniejszenie obciążeń w odniesieniu do narzędzia standardowego o tej samej szerokości. W tym celu przeprowadzono w tych samych warunkach glebowych serię badań przy różnych ustawieniach narzędzia mechatronicznego, z trzema powtórzeniami dla każdej konfiguracji kątów. W czasie testów polowych sekcja była ustawiona do pielienia na głębokości 30 mm. Uzyskane wyniki z 43 prób polowych zebrano w postaci wykresów (rys. 7.32 i rys. 7.33). Wyniki zwizualizowane w formie wykresów słupkowych prezentują ustawienia kątów w czasie danej próby polowej. Zostały one posortowane według wielkości średnich wypadkowych sił F_w , w kolejności rosnącej. Najbardziej istotny wpływ na wielkość generowanych przez narzędzie obciążeń miał kąt β . Wprowadzanie ujemnych wartości kąta według przyjętego sposobu oznaczeń wpływa na wzrost sił wypadkowych, głównie poprzez wzrost składowej F_z poprzez przenoszenie nadmiernego obciążenia sekcji, zamiast koła

podporowego. Takie ustawienie kąta nie ma praktycznego zastosowania dla standardowych upraw rzędowych. Może mieć jednak zastosowanie w przypadku pielienia upraw warzywniczych sianych w redlinach stąd analizowano ten przypadek. W przypadku kąta α , wprowadzanie jego skrajnego dodatniego ustawienia również powodowało wzrost obciążeń jednak nie tak radykalny. Z prezentowanych na wykresach danych wynika, że najlepszymi ustawieniami elementów skrawających glebę w narzędziu mechatronicznym było utrzymywanie niewielkiego odchylenia względem podłoża. Ujemne położenie kąta α nie było testowane z uwagi na jego bezcelowość – nie byłoby możliwe skrawanie gleby, następowałoby jej przesuwanie. Urządzenie posiada ten zakres z uwagi na zakładaną możliwość używania takiego go w czasie formowania powierzchni gleby na wzniesieniach mając na uwadze ograniczanie negatywnych skutków erozji wodnej pól uprawnych. W tym procesie kryterium ograniczania obciążeń będzie jednak sprawą drugorzędną.



Rys. 7.32. Średnie siły wypadkowe narzędzia mechatronicznego w funkcji kątów α i β oraz uśrednionych sił wypadkowych F_w



Rys. 7.33. Zależność kątów α i β oraz uśrednionych sił wypadkowych F_w dla narzędzia mechatronicznego

7.7. Współczynnik redukcji obciążenia

Głównym celem realizowanego doktoratu było wykazanie różnic w obciążeniach narzędzi pielących w dwóch wersjach: standardowej oraz mechatronicznej o nastawnych kątach elementów skrawających glebę oraz dostosowanie ustawień narzędzia tak, aby zmniejszyć obciążenie. Jak wspomniano w metodyce badawczej analizowano jednocześnie wiele parametrów, co pozwoliło na szczegółową analizę i weryfikację problemu badawczego. Przeprowadzona seria badań miała na celu znalezienie ustawiania kątów, które będzie generowało najmniejsze opory i jest nim odpowiednio: $\alpha = 1,1^\circ$ oraz $\beta = 0,8^\circ$.

Przyjęto dwa kryteria porównawcze na podstawie współczynników obliczanych na podstawie sił wypadkowych oraz momentów wypadkowych. Zdecydowano się na wartości wypadkowe obciążeń z uwagi na oddawanie przez nie pełnej informacji na temat oddziaływania na glebę. W przypadku sił wypadkowych najbardziej istotną składową wpływającą głównie na końcową wartość obciążeń jest F_z . W przypadku momentów główną składową wypadkowej jest moment skręcający M_y tzn. wynikający z kierunku jazdy, generowany od skrawania gleby przez narzędzia. Pozostałe składowe analizowano w celu uzyskiwania informacji na temat wpływu trajektorii jazdy pojazdu na obciążenia na narzędziach. Ponadto miały na celu

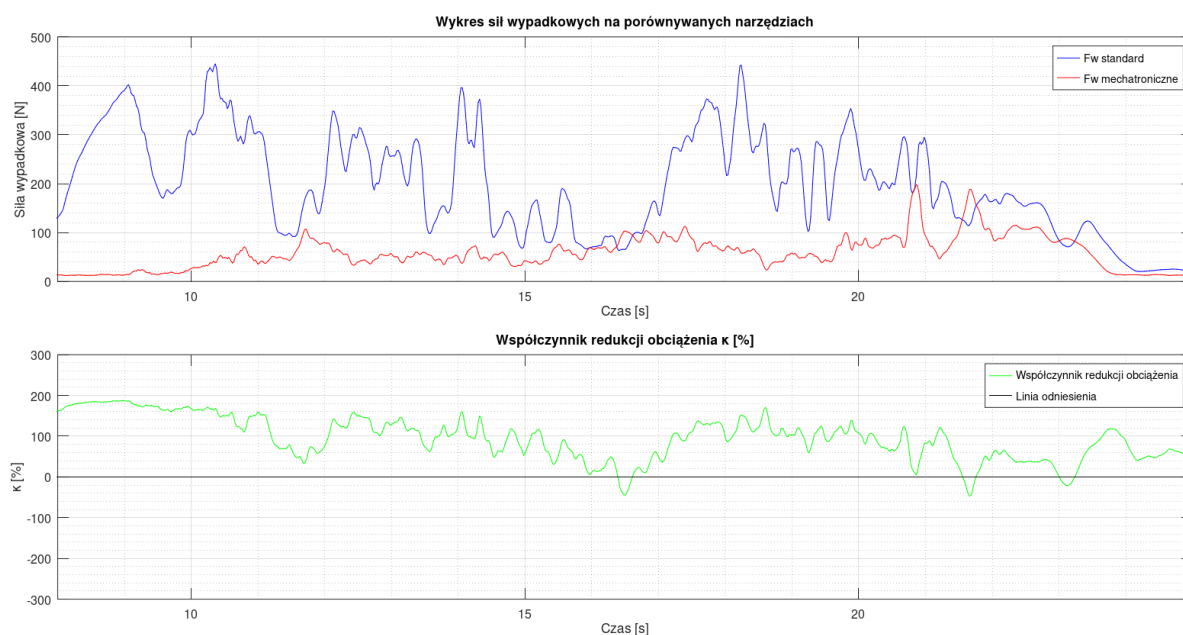
sprawdzenie, czy ewentualne kolizje np. z kamieniami lub korzeniami znajdującymi się w glebie wpływają w znaczący sposób na nie.

W celu obiektywnej oceny różnicy pomiędzy narzędziami wypracowano następujący współczynnik redukcji obciążenia κ , który jest symetrycznym wskaźnikiem procentowej różnicy między generowanymi obciążeniami. Ma on dwa warianty wyznaczane w oparciu o siły wypadkowe (równanie 7.2) oraz momenty wypadkowe (równanie 7.3) porównywane z dwóch narzędzi.

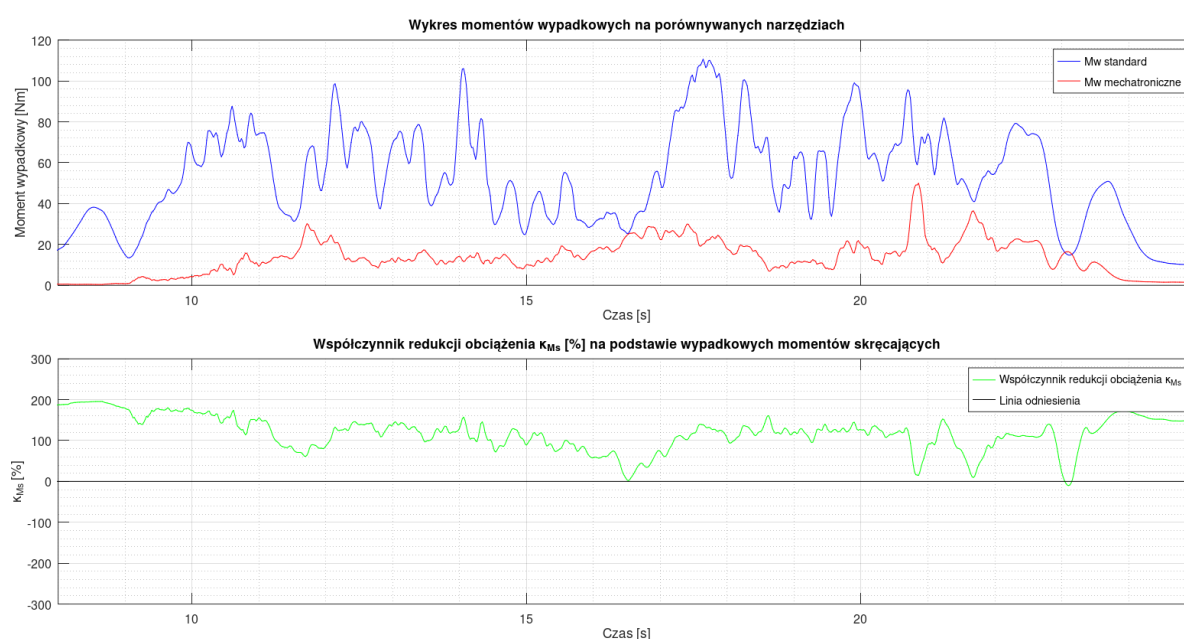
$$\kappa_{Fw} = \left(\frac{F_{w_standard} - F_{w_mechatroniczne}}{(F_{w_standard} + F_{w_mechatroniczne})/2} \right) \cdot 100 [\%] \quad 7.2$$

$$\kappa_{Mw} = \left(\frac{M_{w_standard} - M_{w_mechatroniczne}}{(M_{w_standard} + M_{w_mechatroniczne})/2} \right) \cdot 100 [\%] \quad 7.3$$

Każda przeprowadzona próba została przeanalizowana w formie wykresów, które prezentują przebiegi obciążeń wypadkowych w czasie. Czasy analiz pokrywają się z czasami przyjętymi w rozdziale 7.4 ponieważ siły wypadkowe i momenty wypadkowe były obliczane w oparciu o nie. Z uwagi na bardzo dużą ilość danych przytoczono jedynie trzy przypadki charakterystyk wyznaczonych dla kątów $\alpha = 1,1^\circ$ oraz $\beta = 0,8^\circ$.

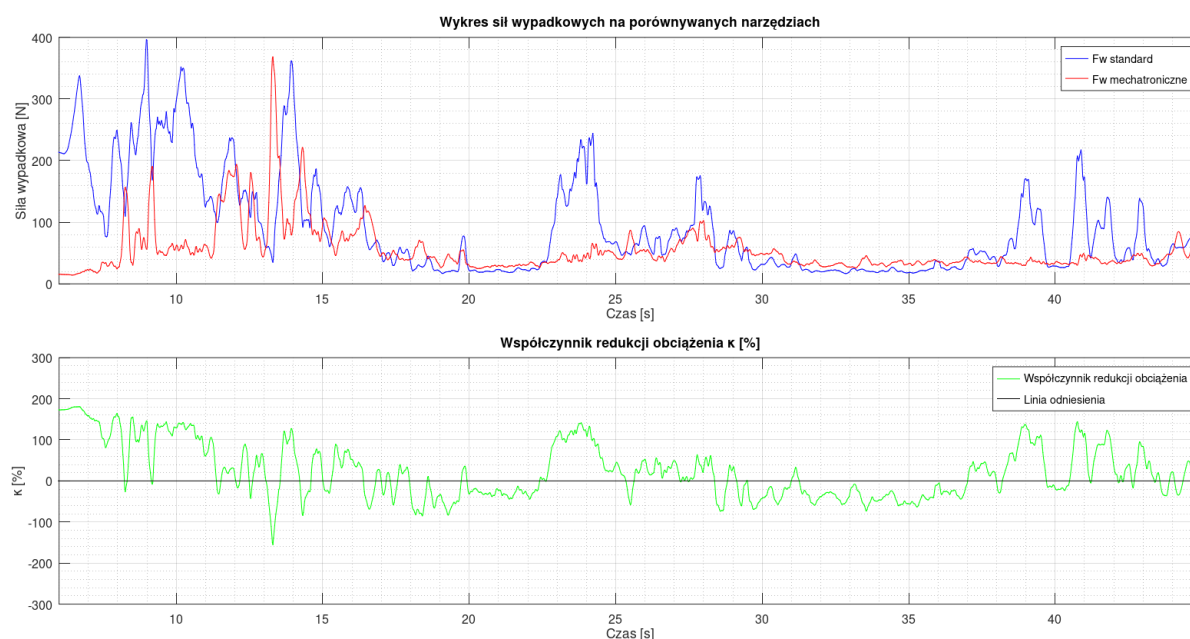


Rys. 7.34. Charakterystyki F_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κ_{Fw} dla próby 2



Rys. 7.35. Charakterystyki M_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κ_{FW} dla próby 2

Próba 2 (rys. 7.34 i rys. 7.35) dla przyjętych najlepszych ustawień kątów (wg numeracji chronologicznej próba 3.2) to badanie, w którym uzyskano najlepsze średnie współczynniki redukcji obciążeń tj. $\overline{\kappa_{FW}} = 95 \%$ oraz $\overline{\kappa_{MW}} = 119 \%$.



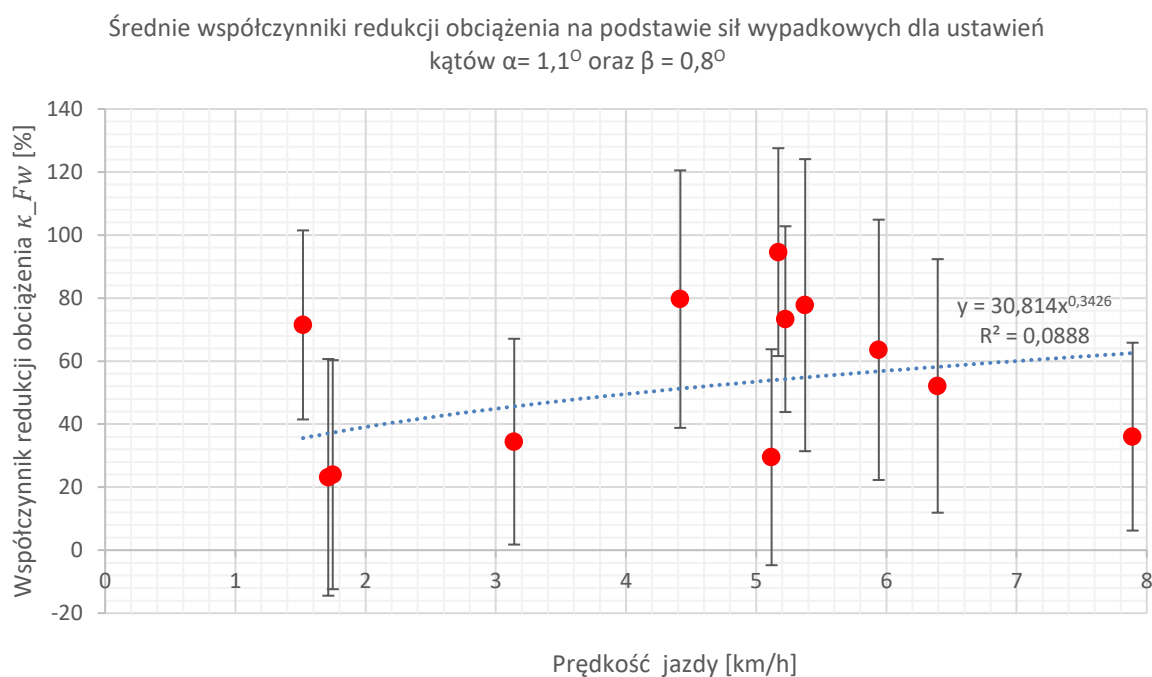
Rys. 7.36. Charakterystyki F_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κ_{FW} dla próby 5



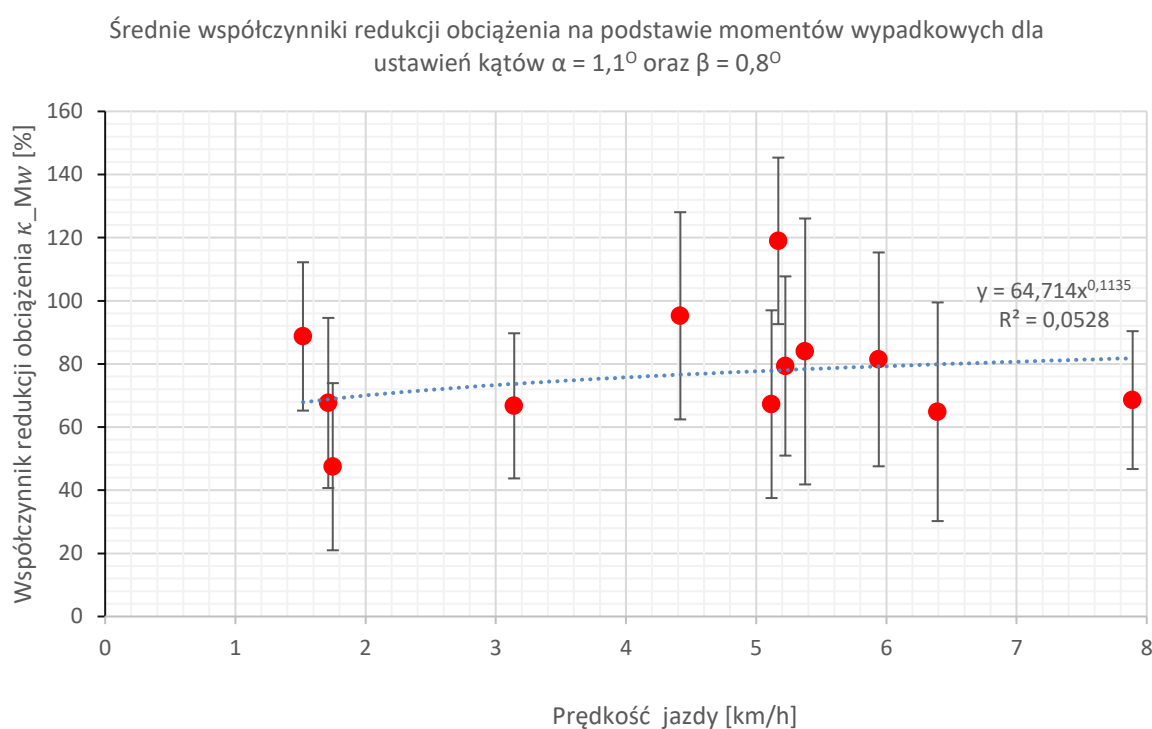
Rys. 7.37. Charakterystyki M_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κ_{FW} dla próby 5

Próba 5 (rys. 7.36 i rys. 7.37) dla przyjętych najlepszych ustawień kątów (wg numeracji chronologicznej próba 3.5) to badanie, w którym uzyskano najgorszy średni współczynnik redukcji obciążeń w oparciu o siły wypadkowe $\overline{\kappa_{FW}} = 23 \%$. Średni współczynnik redukcji w oparciu o moment wypadkowy dla tej próby wyniósł $\overline{\kappa_{Mw}} = 68 \%$. Najgorszym z punktu widzenia postawionej hipotezy badawczej pod względem średniego współczynnika redukcji wyznaczonego na podstawie momentów wypadkowych była próba 11 (wg numeracji chronologicznej próba 3.11), gdzie wyniósł on $\overline{\kappa_{Mw}} = 47 \%$, a $\overline{\kappa_{FW}} = 24 \%$.

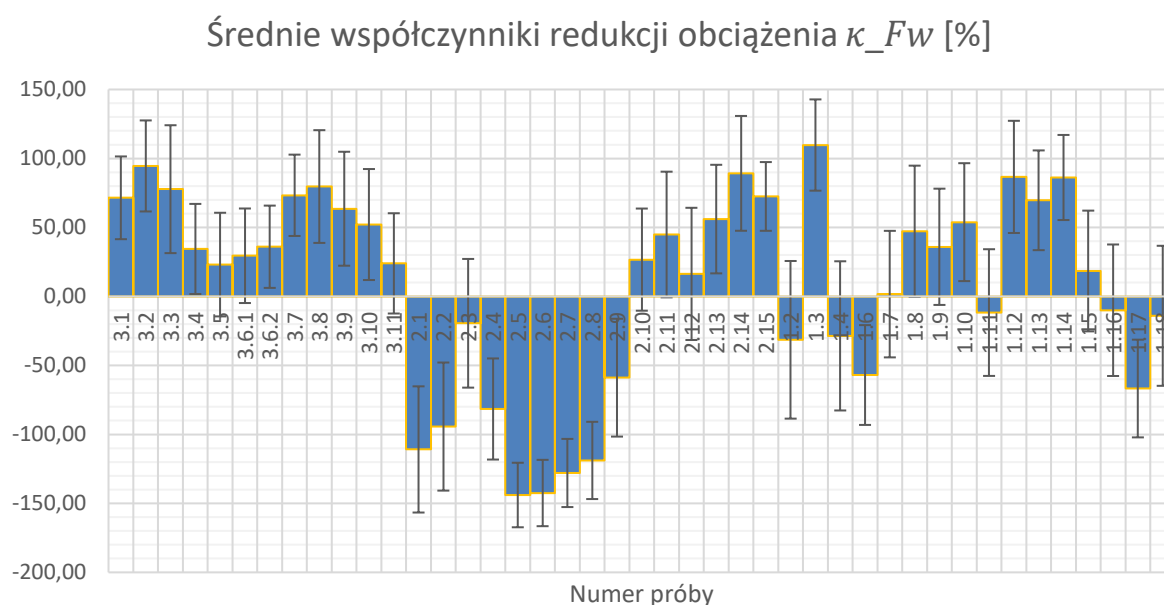
Uzyskane średnie współczynniki redukcji obciążeń z 12 badań przeprowadzonych dla wspomnianych, najlepszych pod względem udowadnianej hipotezy, nastaw kątów elementów skrawających zaprezentowano na dwóch wykresach w funkcji prędkości jazdy. Rys. 7.38 to średnie współczynniki redukcji obciążenia na podstawie sił wypadkowych, na tej podstawie można stwierdzić, że każdy z badanych przypadków spełnia założenia przyjętej hipotezy badawczej. Rys. 7.39 to średnie współczynniki redukcji obciążenia wyznaczone na podstawie momentów wypadkowych, również spełniono założenia hipotezy dla każdego badania, a same wyniki są mniej rozrzucone względem wyznaczonej linii trendu (w porównaniu do $\overline{\kappa_{FW}}$). Warunek zostaje spełniony uwzględniając również rozrzut uśrednionych wartości współczynników.



Rys. 7.38. Średnie współczynniki redukcji obciążenia na podstawie sił wypadkowych dla ustawień kątów $\alpha = 1,1^\circ$ oraz $\beta = 0,8^\circ$

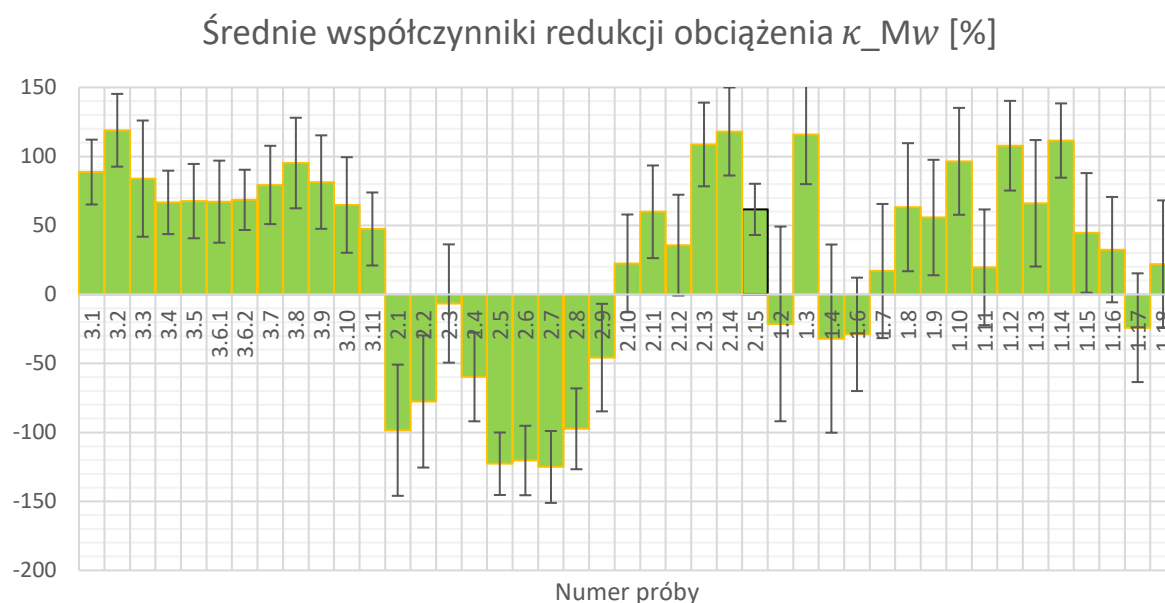


Rys. 7.39. Średnie współczynniki redukcji obciążenia na podstawie momentów wypadkowych dla ustawień kątów $\alpha = 1,1^\circ$ oraz $\beta = 0,8^\circ$



Rys. 7.40. Średnie współczynniki redukcji obciążenia $\overline{\kappa_{Fw}}$ dla wszystkich analizowanych prób w kolejności chronologicznej ich wykonywania wg numeracji od 1.2 do 3.11

Łącznie przeanalizowano 43 próby, które różniły się od siebie ustawieniami opisywanych w dysertacji parametrów procesu pielenia np. prędkości jazdy, ustawień kątów elementów skrawających, czy warunków glebowych (w obrębie jednego pola). Przytoczone wykresy (rys. 7.40 i rys. 7.41) mają na celu zaprezentować różnice w uzyskiwanych współczynnikach redukcji obciążenia, którego wartości ujemne świadczą o tym, że zastosowane w danej próbie ustawienia były niewłaściwe z punktu widzenia udowodnianej hipotezy badawczej, zostały jednak wprowadzone do z uwagi na inne cele. Próby o numerach od 3.1 do 3.11 dotyczą wyznaczonych eksperymentalnie najlepszych ustawień kątów elementów skrawających. Na wykresach słupkowych zamieszczono również odchylenia standardowe analizowanych danych. Każdy przypadek był analizowany według przyjętej i szczegółowo opisanej metodyki. Porównując dane z wykresów (rys. 7.40 i rys. 7.41) można stwierdzić, że obliczane współczynniki w oparciu o momenty wypadkowe cechują się mniejszą zmiennością w porównaniu do obliczanych na podstawie sił wypadkowych. Odchylenia standardowe dla współczynników liczonych w oparciu o momenty wypadkowe również cechują się mniejszą zmiennością.



Rys. 7.41. Średnie współczynniki redukcji obciążenia $\overline{\kappa_{Mw}}$ dla wszystkich analizowanych prób w kolejności chronologicznej ich wykonywania wg numeracji od 1.2 do 3.11

7.8. Podsumowanie

Uzyskane w ramach prowadzonych badań wyniki udowadniają postawioną w doktoracie hipotezę. Opracowana metodyka badawcza mechatronicznej sekcji pielącej wyposażonej w dwa narzędzia, w miarę prowadzonych testów porównawczych, wykazała możliwość zmniejszenia obciążeń generowanych na narzędziu pielącym o co najmniej 23%. Wyprowadzono zależności między cechami geometrycznymi elementów skrawających glebę a obciążeniami. Ponadto wyprowadzono zależność między obciążeniami narzędzi a prędkością wykonywania zabiegu agrotechnicznego, co pozwoli precyzyjniej definiować potrzebną moc nośników narzędzi. Uzyskane wyniki badań odniesiono do warunków glebowych panujących na polu w czasie testów. Finalnie zebrane dane umożliwiły wyznaczenie współczynników redukcji obciążenia dla porównywanych przypadków.

8. Modelowanie procesu zmniejszania obciążeń w czasie pielenia

Prowadzone badania eksperymentalne mechatronicznej sekcji pielącej dostarczyły danych, które potwierdziły założenia projektowe, że wprowadzenie funkcji zmiany geometrii narzędzia pielącego przyczyni się do zmniejszenia generowanych na nim obciążeń. Mając na uwadze dalsze prowadzenie badań w kierunku autonomizacji działania narzędzia brane są pod uwagę dwa możliwe podejścia. Pierwsze z nich zakłada działanie urządzenia i dobór nastaw kątów na podstawie wskazań z czujników zamontowanych lokalnie na maszynie. Alternatywne podejście zakłada komunikację z nadrzędnymi systemami rolnictwa precyzyjnego.

Działanie urządzenia w trybie lokalnego generowania nastaw zakłada zmiany kątów na podstawie uzyskiwanych charakterystyk obciążeń jednego lub więcej narzędzi. W miarę kontynuowania badań i zbierania danych na różnych typach gleb możliwe będzie wyznaczenie ich specyficznych charakterystyk, którym będą odpowiadały wyznaczone doświadczalnie kąty elementów skrawających. Optymalizacja w kierunku zmniejszania obciążeń w oparciu o nastawy kątów według założeń będzie musiała być kompatybilna z systemem przeciwdziałania erozji wodnej gleb. Narzędzie oraz sekcja pieląca dzięki wyznaczonej kinematyce mają możliwość wprowadzenia funkcji kompensowania wpływu pochyłości na proces pielenia. Wspomniana funkcjonalność została opisana w rozdziale dotyczącym erozji wodnej i będzie ona wymagała wprowadzenia do układu pomiarowego czujnika pochylenia maszyny. Rozwijanie układu sterowania maszyny o dodatkowe czujniki może dodatkowo uatrakcyjnić korzystanie z opisywanego, podstawowego, trybu działania maszyny z uwagi na oszczędności związane z brakiem konieczności doposażania urządzenia w precyzyjne systemy pozycjonowania. Jest to jednak sprawa drugorzędna w przypadku agregowania sekcji z autonomicznymi pojazdami rolniczymi, których działanie opiera się właśnie o te systemy. Niemniej jednak adaptacja dodatkowych czujników do lokalnego analizowania parametrów glebowych jak na przykład czujnik wilgotności może znacząco ułatwić znajdowanie przez układ sterowania najlepszych ustawień kątów skrawania, ponieważ ilość zawartej wody w wierzchnich warstwach gleby wpływa znacząco na jej parametry i strukturę, co wykazano w przeglądzie literaturowym w niniejszej dysertacji.

Drugie podejście zakłada współpracę z systemami rolnictwa precyzyjnego, które działają w oparciu o dane pochodzące z map aplikacyjnych i szczegółowych informacji o polu. Mapy aplikacyjne generowane są na podstawie szerokiego zakresu danych dotyczących

warunków glebowych, takich jak typ gleby, zawartość składników odżywczych, poziom wilgotności, a także struktura terenu i jego ukształtowanie. Informacje te mogą być gromadzone za pomocą czujników glebowych, satelitarnych systemów monitorowania, dronów lub zaawansowanych urządzeń do analizy gleby np. georadarami. Po przetworzeniu te dane tworzą mapy zasobności lub ogólniej mapy zmienności pola, które precyzyjnie wskazują, jak różne obszary pola wymagają odmiennych działań agrotechnicznych. W taki sposób odbywałoby się dopasowywanie nastaw kątów narzędzi o zmiennej geometrii. Systemy rolnictwa precyzyjnego integrują dane z sygnałem globalnego pozycjonowania, umożliwiając lokalizację maszyn w czasie rzeczywistym z dokładnością do centymetrów. Dzięki temu możliwe jest dynamiczne wprowadzanie zmian w ustawieniach maszyn rolniczych. W przypadku mechatronicznej sekcji pielącej mogą to być: kąt natarcia narzędzia, głębokość pielenia czy prędkość pracy. Prędkość wykonywania pielenia w opisywanym trybie działania maszyny może wynikać ze stanu baterii pojazdu unikając sytuacji rozładowania maszyny na polu. Możliwe by było również szacowanie czy poziom naładowania baterii jest wystarczający dla zaplanowanego areалу uprawy. Dane uzyskane z badań prowadzonych w ramach doktoratu pozwalają rozpocząć wstępne badania nad tego typu algorytmami.

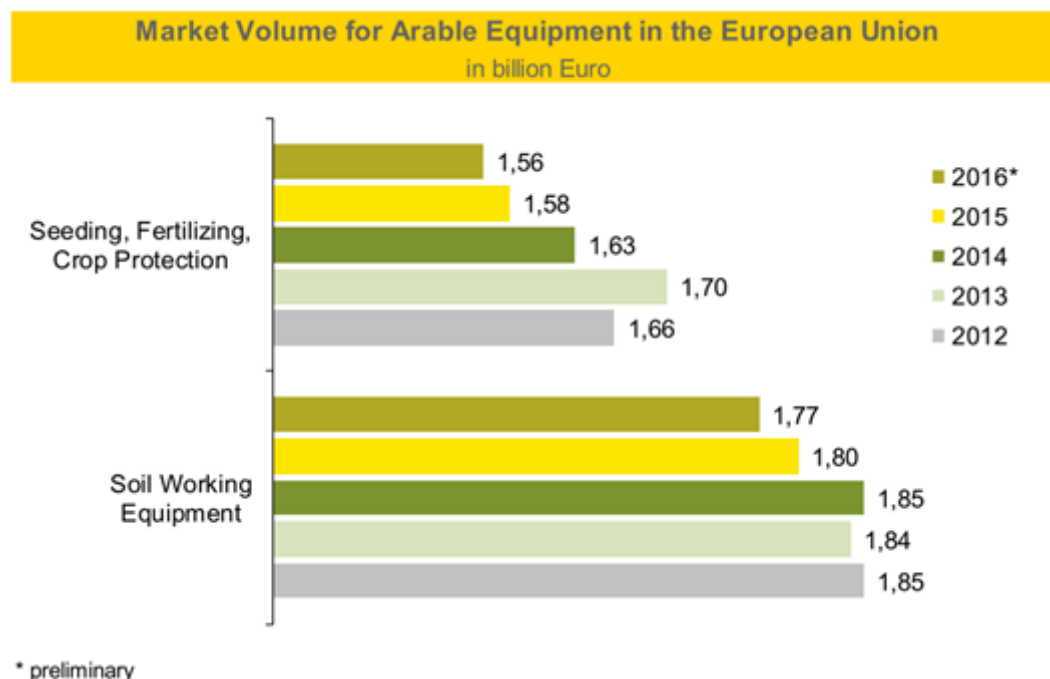
Oba zaproponowane podejścia umożliwią reagowanie na zmieniające się właściwości gleby w różnych częściach pola. Kryterium nadrzędnym będzie oczywiście zmniejszenie energochłonności, które przekłada się na korzyści w zakresie ochrony środowiska oraz lepszego planowania procesów agrotechnicznych, które ma szczególne znaczenia w przypadku nowoczesnych autonomicznych pojazdów rolniczych.

9. Prace wdrożeniowe

9.1. Szacunkowa wartość rynku rolniczych maszyn uprawowych

Wartość rynku rolniczych maszyn uprawowych została oszacowana w oparciu o dane CEMA (ang. Expert Committee Methods of Analysis) European Agricultural Machinery. Jest to organizacja reprezentująca europejski przemysł maszyn rolniczych, które zrzesza duże międzynarodowe firmy, jak i liczne małe i średnie przedsiębiorstwa w 10 krajowych stowarzyszeniach członkowskich. Przemysł rolniczy składa się z około 7 000 producentów, produkujących ponad 450 różnych typów maszyn o rocznych obrotach około 40 miliardów euro (UE28 - 2016) i 150 000 pracowników bezpośrednich. Firmy CEMA produkują szeroką gamę maszyn, które obejmują każdą działalność w polu, od siewu po zbiory, a także sprzęt do zarządzania zwierzętami hodowanymi [161].

W momencie rozpoczęcia prac nad doktoratem analizowano rynek rolniczy na podstawie danych z 5 ostatnich lat. W roku 2016 zauważono spowolnienie spadku sprzedaży sprzętu rolniczego w Europie w segmencie maszyn uprawowych (siew, nawożenie, ochrona roślin oraz maszyny do uprawy gleby). Odnotowano sprzedaż około 3,17 mld euro, co oznacza spadek o -2% w porównaniu do ubiegłego roku. Według danych z 2017 roku w czasie spotkania koordynatorów grup produktowych CEMA określono rynek europejski jako obraz pełen kontrastów. Wskazano na znaczące wzrosty sprzedaży na rynku wschodnim w szczególności w Rosji i na Ukrainie (obecnie sytuacja uległa zmianie). Wzrost na tych rynkach częściowo zrekompensował spadek zamówień z innych krajów. Ogromne spadki sprzedaży odnotowano we Francji i Polsce - z bardzo różnych powodów: we Francji słabe zbiory spowodowały niedobory płynności wśród rolników, podczas gdy w Polsce zablokowane dopłaty miały negatywny wpływ na zdolność rolników do inwestowania w nowy sprzęt uprawowy. Oceniono, że w grupie produktów "sprzęt do pracy w glebie" głównym trendem sprzedażowym jest podążanie w kierunku większych maszyn umożliwiających pracę przy znacznych szerokościach roboczych, a także częstsze włączanie elektroniki i technologii cyfrowej do wyposażenia. Producenci grupy produktów "opryskiwacze" określili rosnący rozmiar maszyn oraz wrażliwość na rolnictwo ekologiczne (organic farming). Europejski rynek sprzedaży opryskiwaczy spadł o -8% [162]. W kolejnych latach zauważalny był wzrost sprzedaży na rynku rolniczych maszyn uprawowych i w 2018 roku według danych częściowych wyniósł 3,43 mld euro, co w porównaniu do 2016 roku daje wzrost, aż o +8% (rys. 9.1 i rys. 9.2).

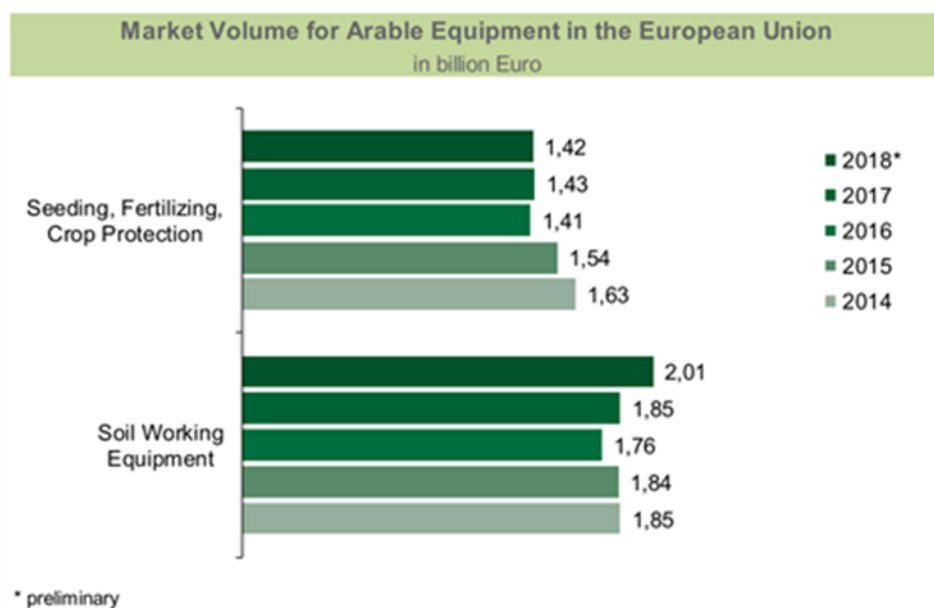


Rys. 9.1. Wielkość rynku urządzeń uprawowych w Unii Europejskiej w miliardach euro w latach 2012-2016 [162]

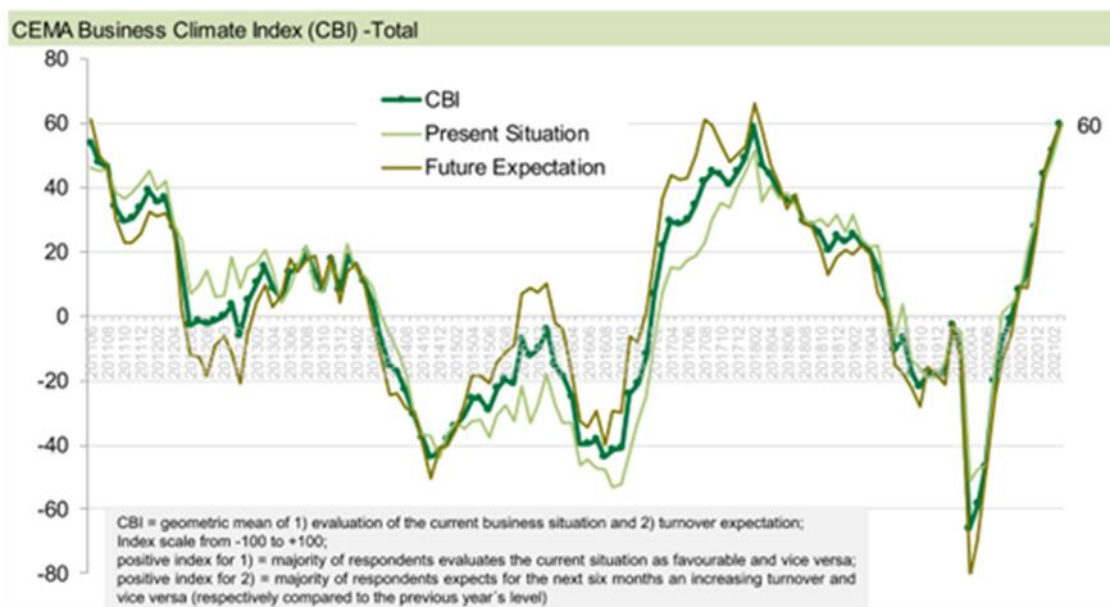
W 2019 roku rynek sprzętu do uprawy gleby wykazał wyraźnie pozytywny rozwój. Członkowie trzech grup produktowych CEMA w czasie corocznego spotkania opierając się na trendach rynkowych stwierdzili, że nacisk kładzie się mniej na liczbę maszyn lub rozmiar, ale raczej na elastyczne i inteligentne rozwiązania dla maszyn wielofunkcyjnych. Aspekty takie jak rolnictwo ekologiczne i zrównoważone, zmiana klimatu, bezpieczeństwo na drogach czy homologacje typu UE są również istotne dla producentów nowoczesnego sprzętu. Klienci chcą przede wszystkim przyjaznych dla użytkownika i podłączonych cyfrowo maszyn. W 2018 roku rynek francuski wykazał kompensacyjny wzrost we wszystkich obszarach sprzętu do uprawy gleby i pielęgnacji roślin po bardzo znaczących spadkach rynkowych do 2017 roku [163].

Ogólny indeks klimatu biznesowego (rys. 9.1, rys. 9.2) dla przemysłu maszyn rolniczych w Europie wzrósł do wyraźnego poziomu boomu (*gwałtowny wzrost gospodarczy, skokowa poprawa koniunktury gosp.*) po osiągnięciu dodatniego zakresu w październiku po raz pierwszy od połowy 2019 r. Wskaźnik CBI (ang. Business Climate Index) obliczany jest przez CEMA na podstawie comiesięcznej ankiety dotyczącej opinii na temat działalności gospodarczej na podstawie aktualnych nastrojów biznesowych i spodziewanych obrotów w ciągu najbliższych 6 miesięcy - oceniana w określonej skali. Jest ona wysyłana do europejskiego przemysłu

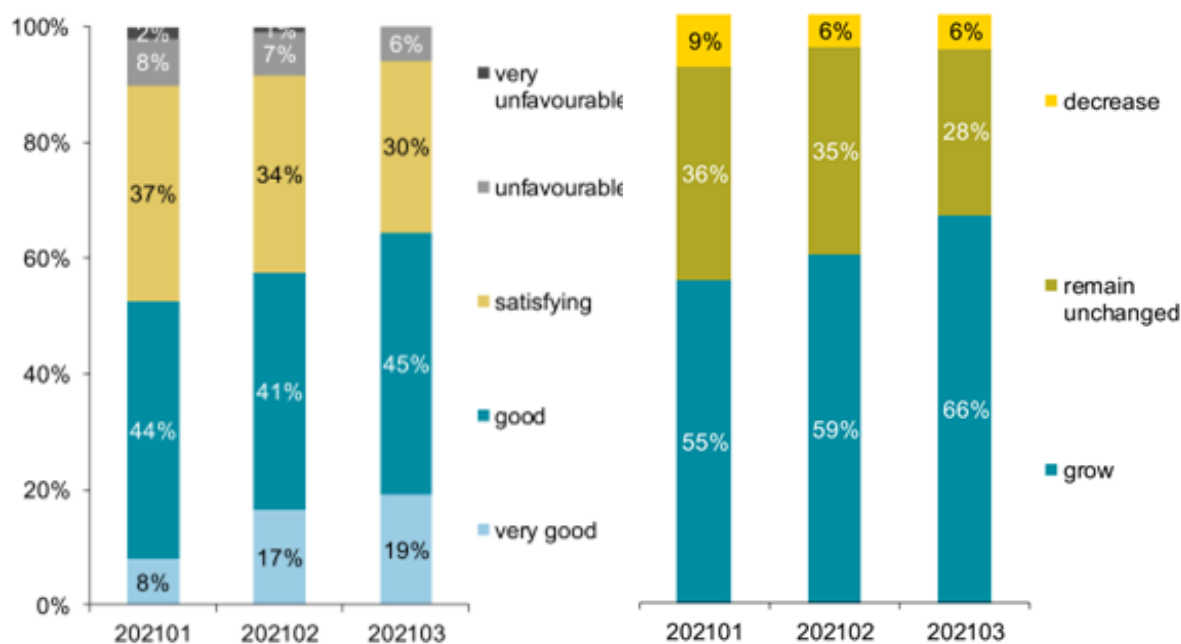
maszyn rolniczych i obejmuje wszystkie główne kategorie produktów. W marcu 2021 r. wskaźnik (rys. 9.3) kształtował się na poziomie +60 pkt. (w skali od -100 do +100). Odnotowano rekordowe skumulowanie zamówień, które zapewniły wysokie obroty na najbliższe miesiące. Znaczna większość firm (94%) określiła swoją sytuację finansową w firmie jako co najmniej satysfakcjonującą lub dobrą (rys. 9.4). Przedstawiciele branży podnieśli oczekiwania względem większości krajów Europejskich. Z przeprowadzonych ankiet wynika, że większość uczestników badania spodziewa się wzrostu obrotów w ciągu najbliższych 6 miesięcy (rys. 9.5). ocenę uzyskała Austria, a za nią Francja, Włochy i Polska. Oczekiwania dotyczące poszczególnych rynków są w dużej mierze zgodne z postrzeganymi potrzebami inwestycyjnymi. W odniesieniu do całego roku 2021 przedstawiciele europejskiego przemysłu prognozują dla swojej firmy wzrost obrotów o + 8% (w grudniu prognoza wciąż wynosiła średnio 4%). Oczekuje się, że impuls do pozytywnego rozwoju ponownie nadejdzie z Europy, Ameryki Północnej i Oceanii [164].



Rys. 9.2. Wielkość rynku urządzeń uprawowych w Unii Europejskiej w miliardach euro w latach 2014 – 2018 [163]



Rys. 9.3. Indeks klimatu biznesowego CEMA (CBI) - łącznie [164]

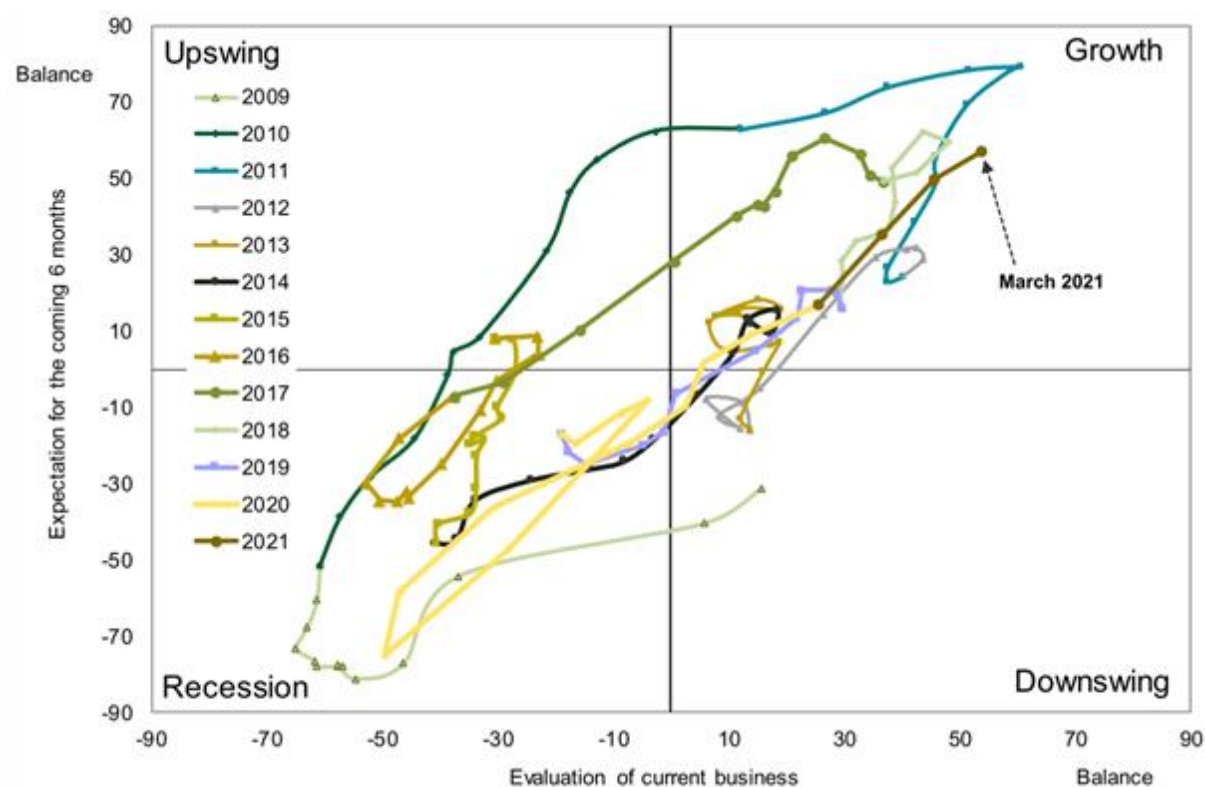


Rys. 9.4. Bieżąca ocena działalności przedsiębiorstwa z podziałem na miesiące [164]

Rys. 9.5. Ocena przewidywanego całkowitego obrotu przedsiębiorstw w ciągu najbliższych 6 miesięcy [164]

Rynek maszyn rolniczych na przestrzeni ostatnich 10 lat charakteryzuje się dużą niestabilnością (rys. 9.6). Ma na to wpływ wiele różnych czynników np. funkcjonowanie dopłat

dla rolników, warunków atmosferycznych (susze lub podtopienia pól mające wpływ na późniejsze zbiory), choroby upraw (choroby roślin, szkodniki) itp. Obecnie zauważalna jest tendencja wzrostowa sprzedaży maszyn rolniczych, która utrzymuje się od połowy 2020 roku.



Rys. 9.6. Klimat biznesowy - ilustracja cyklu biznesowego [164]

9.2. Analiza konkurencyjności

Istnieje wiele definicji konkurencyjności oraz sposobów jej analizowania. Nie jest ona jednoznacznie rozumiana przez badaczy i istnieje wiele publikacji ukazujących różnice w interpretowaniu tego pojęcia. W celu lepszego zrozumienia istoty dokonywanej analizy przytoczono jedną z nich. Według S. Flejterskiego *konkurencyjność to zdolność do projektowania, wytwarzania i sprzedawania towarów, których ceny, jakość i inne walory są bardziej atrakcyjne od odpowiednich cech towarów konkurentów*. Konieczne jest zatem dokładne przeanalizowanie funkcjonowania przedsiębiorstwa i porównanie go na tle podobnych jednostek, co zostanie przeprowadzone w dalszej części rozdziału (tabela 14). W tym celu konieczne jest wybranie kryteriów oceny. R. Śliwiński podzielił czynniki konkurencyjności na trzy kategorie: zasoby materialne, niematerialne i ich kombinacje [165].

*Tabela 14. Analiza konkurencyjności instytutu Sieć Badawcza Łukasiewicz –
Poznańskiego Instytutu Technologicznego pod kątem realizacji wdrożenia przedmiotu
doktoratu [165]*

CZYNNIKI KONKURENCYJNOŚCI		
GRUPA	KRYTERIUM	OPIS
ZASOBY MATERIALNE	Pracownicy	Instytut posiada szeroką grupę wykwalifikowanych pracowników w dziedzinach konstrukcji, badań oraz automatyzacji maszyn – również rolniczych maszyn mobilnych. Realizacja wielu innowacyjnych projektów przyczynia się do zgłębiania wiedzy z zakresu mechatroniki, co pozytywnie wpływa na realizację przedmiotu doktoratu.
	Budynki, grunt, maszyny	Instytut posiada niezbędne zaplecze do montażu oraz testowania prototypów projektowanego urządzenia. W tym ciągniki rolnicze oraz roboty polowe do agregowania maszyny w celu prowadzenia badań polowych w warunkach rzeczywistych.
	Systemy informatyczne, sprzęt i osprzęt komputerowy	Posiada rejestratory sygnałów niezbędne do przeprowadzenia badań oraz infrastrukturę badawczą - wypracowaną w czasie realizowania dotychczasowych projektów. Dysponuje także sprzętem komputerowym na potrzeby realizacji analiz i symulacji.
	Kapitał finansowy	Finansowanie prac związanych z przedmiotem wdrożenia możliwe jest ze środków przeznaczonych na rozwój kadry. Możliwe jest również ubieganie się o dofinansowanie z Narodowego Centrum Nauki - PRELUDIUM przeznaczone dla naukowców nieposiadających stopnia doktora.
ZASOBY NIEMATERIALNE	Wiedza, kompetencje, technika i technologia	Instytut nie jest przedsiębiorstwem produkcyjnym posiada jednak niezbędne zaplecze do wykonywania prototypów. Przede wszystkim dysponuje odpowiednią wiedzą i doświadczeniem z zakresu uruchomień, montażu i badań maszyn. W szczególności prototypów.

	Patenty	Instytut posiada około 60 nadanych patentów (dotyczących maszyn rolniczych) oraz kilka zgłoszeń patentowych. Dodatkowo posiada 24 wdrożenia projektowanych maszyn do przemysłu.
	Model sprzedaży i system dystrybucji	Jako model komercjalizacji przyjęto udzielanie licencji niewyłącznych zainteresowanym firmom. Dopuszcza się również produkcję jednostkową urządzenia oraz sprzedaż bezpośrednią.
	Technologie, produkt i jego cechy różnicujące, dające klientowi większe niż produkty konkurencji korzyści w użytkowaniu	Projektowane urządzenie ma charakter innowacyjny dlatego ciężko je porównywać z konkretnymi rozwiązaniami konkurencji. Mechatroniczny pielnik będzie głównie dedykowany do nowoczesnych maszyn rolniczych korzystających z rozwiązań rolnictwa precyzyjnego np. autonomicznych maszyn mobilnych, które znajdują zastosowanie szczególnie w ekologicznych uprawach.
	Kultura przedsiębiorstwa ukierunkowana na wyniki	Jednym z głównych kierunków działalności Instytutu jest wdrażanie i upowszechnianie wyników własnych prac naukowo-badawczych i projektowych. Wszystkie zespoły badawcze i naukowe Instytutu dążą do tego, aby wyniki ich pracy znajdowały zastosowanie w praktyce gospodarczej, jak również, aby wzbogacały wiedzę teoretyczną i empiryczną w zakresie między innymi techniki rolniczej [1].
	Struktura organizacyjna	Instytut składa się z centrów badawczych, które specjalizują się w ściśle określonych dziedzinach. Centrum Nowoczesnej Mobilności specjalizuje się między innymi w rozwijaniu techniki rolniczej, w szczególności maszyn mobilnych.
KOMBINACJE	Reputacja przedsiębiorstwa	Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny jest jedynym instytutem badawczym oferującym na polskim rynku usługi w zakresie rozwijania nowoczesnych rozwiązań z zakresu maszyn rolniczych. Instytut bierze udział

		w międzynarodowych targach i wystawach wynalazków, gdzie przedstawia i promuje swoje wynalazki i technologie, za które przyznano wiele znaczących nagród [1]. Posiada wiele wdrożeń oraz patentów świadczących o wysokiej innowacyjności opracowywanych rozwiązań oraz wysokiej pozycji na rynku.
	Bariery wejścia	Innowacyjny mechatroniczny pielnik będący przedmiotem wdrożenia zostanie objęty ochroną patentową w celu uniemożliwienia wejścia na rynek podobnych rozwiązań konkurencji. Wdrażanie w produkcję będzie polegało na podpisaniu umowy wdrożeniowej z zainteresowaną firmą i udzielania licencji.

9.3. Identyfikacja wczesnych klientów

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny jest instytutem badawczym o znaczeniu ogólnokrajowym. Prowadzi prace naukowe i badawcze dotyczące maszyn roboczych, pracuje przede wszystkim dla intensywnie rozwijającego się polskiego przemysłu maszyn rolniczych. Pracując nad wdrożeniem zaprojektowanego narzędzia nie przewiduje się sprzedaży i dystrybucji seryjnej projektowanego urządzenia. Poprzez klientów rozumie się przedsiębiorstwa posiadające bazę zaufanych odbiorców oraz wyspecjalizowane jednostki zajmujące się marketingiem. Wdrożenie będzie polegało na umowie licencyjnej. Przemysł ten to ponad 250 producentów, z których ok. 90% stanowią małe i średnie przedsiębiorstwa nieposiadające żadnego własnego zaplecza badawczego, a niekiedy również działów konstrukcyjnych. Dla tych dynamicznych firm, walczących z sukcesem o swoją pozycję na rynku, Instytut jest sprawdzonym partnerem naukowym w obszarze projektowania i badań nowych konstrukcji maszyn oraz wdrażania nowych technologii [1]. Polskie rolnictwo z powodzeniem wprowadza coraz więcej nowoczesnych maszyn spełniających wymogi rolnictwa precyzyjnego. Opracowane rozwiązanie idealnie wpisuje się w najnowsze trendy. Biorąc pod uwagę dotychczasową współpracę Sieci Badawczej Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego z polskim przemysłem maszyn rolniczych oraz ogólnie światowe trendy sprzedażowe można stwierdzić, że znalezienie firmy chcącej wdrożyć rozwiązanie do swojej produkcji nie będzie problemem.

9.4. Analiza strategiczna SWOT projektu

Analiza SWOT jest metodą badawczą, której głównym celem jest określenie aktualnej i perspektywicznej pozycji przedmiotu analizy oraz prognoza strategii postępowania. Jest to kompleksowa metoda służąca do badania otoczenia organizacji oraz analizy jej wnętrza. Nazwa SWOT jest akronimem angielskich słów *Strengths* (mocne strony organizacji), *Weaknesses* (słabe strony organizacji), *Opportunities* (szanse w otoczeniu), *Threats* (zagrożenia w otoczeniu) [166]. Metodyka analizy została szczegółowo opisana w źródłach naukowych [166,167].

Skupiono się na analizie SWOT projektowanego urządzenia w ramach doktoratu wdrożeniowego tzn. mechatronicznej sekcji pielącej oraz narzędzia o zmiennej geometrii elementów skrawających umożliwiających dostosowywanie się do warunków panujących na polu w celu zmniejszania energochłonności pielenia mechanicznego. Zdefiniowany przedmiot analizy został scharakteryzowany pod kątem kryteriów narzuconych przez metodę badawczą SWOT w szerokim ujęciu między innymi funkcjonalności urządzenia, zgodności z trendami rolniczymi, uwzględnieniem doświadczenia w projektowaniu innowacji oraz zagadnieniami związanymi z rynkiem maszyn rolniczych. Rozróżnione ze względu na sposób oddziaływania na projekt kryteria i czynniki jako wewnętrzne oraz zewnętrzne stanowiły dalszą część analizy prowadzącej do określenia strategii działania nad projektem.

Tabela 15. Analiza SWOT projektowanego urządzenia w ramach doktoratu wdrożeniowego, opracowanie własne w oparciu o [167]

Czynniki	Pozytywne	Negatywne
Wewnętrzne	MOCNE STRONY (S): - innowacyjność, - projekt wpisuje się w obecne trendy rolnicze, - ograniczanie energochłonności procesu pielienia, - zastosowanie w ekologicznych uprawach cieszących się coraz większą popularnością, - poruszony kluczowy problem pielęgnacji upraw, - spełnia wymogi rolnictwa precyzyjnego, - doświadczenie wykonawców w zakresie projektowania i automatyzacji maszyn.	SŁABE STRONY (W): - koszt końcowy - z uwagi na zastosowanie automatycznych elementów sterujących może osiągnąć znaczną kwotę, - problemy związane z dostępnością podzespołów, - poziom skomplikowania.
Zewnętrzne	SZANSE (O): - połączenie Instytutów w Sieć Badawczą Łukasiewicz daje dodatkowe możliwości kontaktu z przedsiębiorstwami - potencjalnymi klientami, - rozwijający się trend automatyzacji i informatyzacji rolnictwa, - targi rolnicze promujące nowe technologie, - propagowanie polskiego przemysłu rolniczego.	ZAGROŻENIA (T): - brak zainteresowania ze strony rolników, - pojawienie się na rynku podobnego urządzenia, - zmiana trendów w rolnictwie.

Kolejnym etapem jest określenie strategii realizacji projektu. W tym celu wykonano zestawienie powyższych cech oraz nadano im odpowiednie wagi uzależnione od ich istotności z punktu widzenia rynku rolniczego i oceny w 9 stopniowej skali (od 0 do 8) w zależności od ich wpływu na realizowany projekt (tabela 16). Suma wag elementów w każdej kategorii musi być równa 1.

Wyróżnia się 4 rodzaje strategii, których szczegółowe charakterystyki są opisane w cytowanym źródle naukowym:

- sytuacja SO (mocne strony-szanse) – strategia maxi-maxi (agresywna),
- sytuacja WO (słabe strony-szanse) – strategia mini-maxi (konkurencyjna),
- sytuacja ST (mocne strony-zagrożenia) – strategia maxi-mini (konserwatywna),
- sytuacja WT (słabe strony-zagrożenia) [167].

Tabela 16. Klasyfikacja elementów składowych czynników analizy SWOT

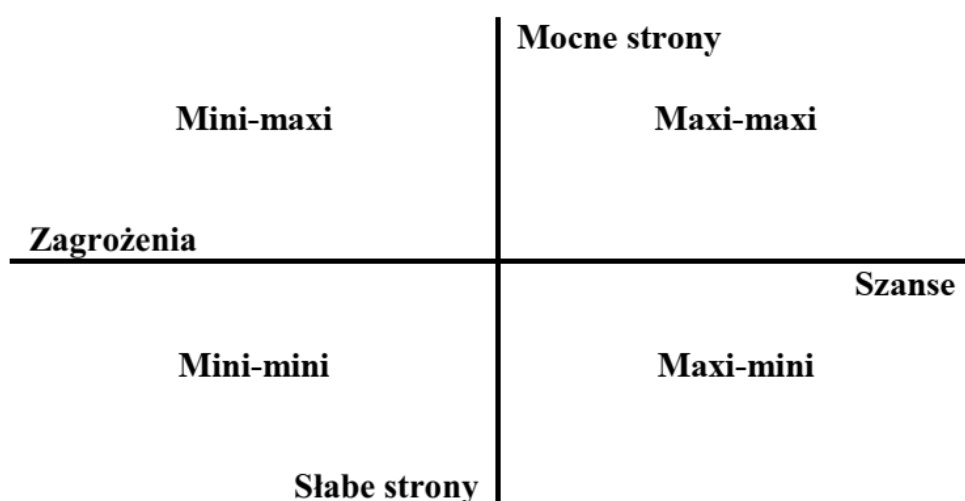
Lp.	Element	Waga	Ocena	Iloczyn
S1	Innowacyjność	0,1	6	0,6
S2	Projekt wpisuje się w obecne trendy rolnicze	0,15	8	1,2
S3	Ograniczanie energochłonności procesu pielenia	0,2	8	1,6
S4	Zastosowanie w ekologicznych uprawach cieszących się coraz większą popularnością	0,15	6	0,9
S5	Poruszony kluczowy problem pielęgnacji upraw	0,2	7	1,4
S6	Spełnia wymogi rolnictwa precyzyjnego	0,1	7	0,7
S7	Doświadczenie wykonawców w zakresie projektowania i automatyzacji maszyn	0,1	8	0,8
Średnia ważona:				7,2
W1	Koszt końcowy - z uwagi na zastosowanie automatycznych elementów sterujących może osiągnąć znaczną kwotę	0,5	5	2,5
W2	Problemy związane z dostępnością podzespołów	0,2	7	1,4
W3	Poziom skomplikowania	0,3	6	1,8
Średnia ważona:				5,7
O1	Połączenie Instytutów w Sieć Badawczą Łukasiewicz daje dodatkowe możliwości	0,1	8	0,8

	kontaktu z przedsiębiorstwami - potencjalnymi klientami			
O2	Rozwijający się trend automatyzacji i informatyzacji rolnictwa	0,3	7	2,1
O3	Targi rolnicze promujące nowe technologie	0,2	8	1,6
O4	Propagowanie polskiego przemysłu rolniczego	0,4	6	2,4
Średnia ważona:				6,9
T1	Brak zainteresowania ze strony rolników	0,5	8	4
T2	Pojawienie się na rynku podobnego urządzenia	0,3	5	1,5
T3	Zmiana trendów w rolnictwie	0,2	6	1,2
Średnia ważona:				5,5

Powołując się na źródła literaturowe, w celu określenia pozycji strategicznej projektu i jej kierunków konieczne jest obliczenie, według poniższych formuł, współrzędnych punktu obrazującego rodzaj strategii i przypisanie go do właściwej ćwiartki układu współrzędnych kartezjańskich (rys. 9.7).

$$Y = |\text{mocne strony}| - |\text{słabe strony}| = 7,2 - 5,7 = 1,5$$

$$X = |\text{szanse}| - |\text{zagrożenia}| = 6,9 - 5,5 = 1,4$$



Rys. 9.7. Strategie według analizy SWOT [167]

Na podstawie obliczonych współrzędnych punktu określono strategię dalszych działań jako maxi-maxi (agresywną). Większość charakterystyk tej strategii dotyczy analiz przedsiębiorstwa. W opisywanym przypadku poddano analizie SWOT sam projekt dlatego w oparciu o źródła naukowe [166,167] dokonano odpowiedniej interpretacji wytycznych. W strategii maxi-maxi powinno się wykorzystywać szanse z otoczenia wymienione w tabeli 15 korzystając z mocnych stron projektu poprzez silną ekspansję rynku i próby osiągnięcia celu (wdrożenia projektu) korzystając ze zróżnicowanych środków (w aspektach projektowania, symulacji, finansowania, wdrażania itp.). Należy dalej rozwijać silne strony i starać się osiągnąć efekt zadowalający szerokie spektrum producentów maszyn rolniczych, a dalej samych rolników.

9.5. Kryteria wyceny produktu

Cena i jakość końcowego produktu są kluczowymi kryteriami uwzględnianymi w czasie projektowania wdrażanego produktu. Końcowy koszt jest miarą odzwierciedlającą znaczenie produktu dla klienta. Według P. Siuby [168] odniesienie sukcesu jest możliwe jeśli zostaną spełnione dwa podstawowe kryteria: konieczne jest zaoferowanie klientowi wartości, której poszukuje oraz właściwe ujęcie tej wartości w cenie. Podaje również powody, dla których organizacje ich nie przestrzegają - odniesiono się do nich w aspekcie projektowanego urządzenia:

- brak optymalnej konfiguracji produktu pod oczekiwania klienta. Nadmierne komplikowanie wyrobu poprzez wyposażanie go w niepotrzebne funkcje powoduje ustawianie ceny na zawyżonym poziomie, co zmniejsza jego konkurencyjność na rynku. Projektując urządzenie będzie brana pod uwagę optymalizacja pod kątem funkcjonalności i oczekiwań odbiorców.
- Ustalanie ceny w oparciu o strategię "koszt-plus" polegającą na narzuceniu określonej marży na koszty wytworzenia produktu. Powoduje to częste wahanie się cen związane ze wzrostem kosztów produkcji, zmianami cen półproduktów oraz ich ogólną dostępnością na rynku. Zwiększanie cen zmniejsza popyt na wyrób. W celu właściwego określenia ceny należałoby przeprowadzić odpowiednie badania rynku wyznaczającego poziom akceptowalności ceny przez klientów. Rynek maszyn rolniczych jest jednak szczególnie pod tym względem ponieważ rolnicy cenią sobie niezawodność maszyn i są skłonni do przeznaczenia większej kwoty na zakup w celu uzyskania lepszej jakości. W odniesieniu

do projektowanego urządzenia analizy rynkowe zostaną przeprowadzone przez dział marketingu potencjalnych zainteresowanych.

- Ceny powinny być wyrażone w przejrzysty sposób tzn. powinny mieć dobraną odpowiednią metrykę np. cena za jednostkę itp. W przypadku projektowanego urządzenia cena będzie uzależniona od oczekiwanej przez klienta liczby sekcji uprawowych - liczby poddawanych zabiegowi pielienia rzędów roślin. Wszelkie końcowe ceny muszą być przejrzyste oraz zawierać ewentualne koszty amortyzacji.
- Niewłaściwe prognozy popytu prowadzą do ustalenia nieoptymalnych cen. Niedośzacowanie ceny początkowej może spowodować przewyższenie podaży przez popyt. Oznacza to, że cena nie była właściwie określona. Ważne jest przeprowadzenie wspomnianych wcześniej analiz rynkowych.
- Brak segmentacji klientów może powodować niewłaściwe różnicowanie wyrobu. Już na etapie projektowania brane są pod uwagę różne dodatkowe funkcje urządzenia. Należy w przemyślany sposób oddzielać pakiety funkcjonalności w przeciwnym razie najniższy pakiet cenowy może się okazać wystarczający dla wszystkich segmentów klientów. Różne potrzeby klientów muszą być odzwierciedlone w maszynie i zaspakajać różne potrzeby np. gospodarstwa wielkoobszarowe mogą być nastawione na wydajność i zmniejszoną energochłonność, natomiast średnie i małe gospodarstwa zajmujące się hodowlą roślin specjalistycznych (np. roślin przyprawowych) będą nastawieni na dokładność i jakość pielienia.

Wymienione czynniki wpływające na cenę końcową produktu były brane pod uwagę szczególnie pod względem zapewnienia modułowości projektowanego urządzenia dając możliwość wybrania funkcji, których klient końcowy głównie oczekuje. Z uwagi na przyjęty model komercjalizacji jako udzielanie licencji na wyniki doktoratu wdrożeniowego nie zamieszczono wyceny opracowanego rozwiązania. Koszt końcowy poniekąd będzie domeną przedsiębiorstwa wdrażającego i jest pochodną wielu czynników, między innymi technologicznych, geograficznych oraz ekonomicznych, takich jak dostępność surowców, koszty produkcji, logistyka, skala produkcji oraz specyficzne wymagania rynkowe. Dodatkowo wpływ na ostateczne koszty mają również czynniki prawne i regulacyjne, takie jak normy środowiskowe, lokalne przepisy oraz koszty certyfikacji produktów

9.6. Funkcje maszyny oraz specyfikacja

Mechatroniczna sekcja pieląca (rys. 9.8) została wyposażona w szereg urządzeń zapewniających następujące cechy funkcjonalne:

- możliwość automatycznego regulowania głębokości pielenia do 80mm poprzez zmianę położenia koła kopiującego względem elementów skrawających w narzędziach,
- automatyczną regulację kąta γ (jednoczesnego pochylenia narzędzi pielących) w zakresie od -35° do 35° poprzez siłownik hydrauliczny mogący pełnić również funkcję elementu zabezpieczającego przed przeciążeniem po modyfikacji układu hydraulicznego,
- automatyczną regulację kąta skrawania α w zakresie od -10° do 10° , która szczególnie wpływa na wielkości generowanych przez narzędzie obciążeń, a jego zmiana wg przeprowadzonych badań pozwoliła uzyskać średni współczynnik redukcji obciążenia o wartości minimum $\bar{\kappa} = 23$, największa wartość współczynnika w prowadzonych badaniach wyniosła natomiast $\bar{\kappa} = 95$.
- Automatyczną regulację kąta pochylenia elementów skrawających β w zakresie od -27° do 7° .
- Sekcja pieląca wyposażona w równoległobok dzięki, któremu zmiana głębokości pielenia nie wpływa na kąty skrawania. Dodano również funkcję pozwalającą w prosty sposób dociągać lub odciągać sekcję w przypadku problemów z zagłębianiem się narzędzi poprzez zastosowanie sprężyn łączących ramiona równoległoboku.
- Zastosowanie sterownika daje możliwość sterowania dodatkowym osprzętem np. układem zadawania nawozów stałych lub ciekłych oraz zbieranie danych z ewentualnych dodatkowych czujników.
- Strefa pieląca może być dostosowywana do różnych upraw poprzez regulację położenia uchwyty narzędzia na poziomych belkach na szerokościach wynikających z ich długości wg założeń maksymalnie 750 mm ale wartość ta w prosty sposób może zostać zwiększona.
- Narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających ma możliwość wymiany dłuta, które jest elementem eksploatacyjnym. Zmiany mogą wynikać również ze specyficznych warunków panujących na polach np. dużej ilości resztek poźniwnych lub

kamieni oraz z uwagi na typ gleby – geometria dłuta w zależności od warunków panujących na polu może być kolejnym obszarem do prowadzenia badań.

- Kinematyka urządzenia zapewnia możliwość agregowania jej z różnymi nośnikami, przede wszystkim maszynami autonomicznymi, dla których zmniejszanie energochłonności ma szczególne znaczenie. Zapewniono również kompatybilność z nowoczesnymi pielnikami z systemami naprowadzania na rzędy roślin, których nośnikami są ciągniki rolnicze.

Oprócz wymienionych cech funkcjonalnych maszyna posiada następującą specyfikację:

- napięcie zasilania układu elektrycznego 12VDC,
- maksymalne ciśnienie układu hydraulicznego 200 bar, maksymalny przepływ 20 l/min.
- masa w zależności od konfiguracji maksymalnie 90 kg z możliwością odciążania lub dociążania sekcji.



Rys. 9.8. Mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii elementów skrawających glebę

9.7. Integracja z innymi systemami oraz perspektywy rozwoju

Urządzenie zostało zaprojektowane w sposób umożliwiający integrację z nowoczesnymi systemami agrotechnicznymi w tym systemami rolnictwa precyzyjnego. Dzięki wyposażeniu mechatronicznej sekcji pielącej w zestawy czujników oraz elementów wykonawczych możliwe jest testowanie kolejnych algorytmów sterowania poprzez sterownik główny maszyny. Połączenie działania nowoczesnego pielnika z sygnałem pozycjonowania oraz mapami zasobności gleb dostarczających informacji na temat wilgotności oraz typu gleby możliwe będzie dobieranie wstępnych nastaw dla narzędzia o zmiennej geometrii. W przypadku stosowania rolniczych, autonomicznych, pojazdów planowanie może odbywać się już na etapie siewu dzięki czemu możliwe byłoby uwzględnianie rozmieszczenia rzędów roślin w sposób zmniejszający skutki erozji gleb. W Sieci Badawczej Łuksiewicz – Poznańskim Instytucie Technologicznym prowadzone są w tym zakresie badania. Integracja wczesnego planowania ścieżek przejazdów maszyn uwzględniające ukształtowanie terenu w połączeniu z ekologicznym pieleniem mechanicznym, które pozwala zmniejszyć energochłonność może znaleźć powszechne zastosowanie w nowoczesnych robotach polowych. Wyposażenie mechatronicznej sekcji pielącej w zestaw sensorów może również pozwolić na odwrotne podejście tzn. zapisywać dane w połączeniu z sygnałem pozycjonowania i na tej podstawie wykonywać mapy zasobności np. mapując obciążenia generowane na narzędziach a na tej podstawie wnioskować o mozaikowości gleb, czy stopniu zakamienienia pól uprawnych. Wykonane analizy literaturowe stanu techniki w odniesieniu do pielenia mechanicznego wykazały trend automatyzacji, którego celem jest polepszanie ergonomii pracy użytkowników pielników przy jednocześnie zwiększonej wydajności. Naturalnym krokiem będzie adaptacja urządzenia w połączeniu z systemem naprowadzania narzędzi pielących na rzędy roślin. Autonomiczne pojazdy oraz ciągniki oprócz naprowadzania na zaplanowany tor jazdy posiadają również systemy lokalnego korygowania narzędzi pielących względem roślin. Połączenie dwóch podejść zwiększających precyzję, prędkość oraz wydajność ze zmniejszaniem energochłonności procesu może przyczynić się do zwiększenia opłacalności ekologicznego pielenia, któremu ciężko jest konkurować z powszechnymi i wygodnymi dla rolników metodami pielenia chemicznego.

Rozwój urządzenia zakłada prowadzenie badań w zakresie kształtowania powierzchni pól uprawnych w celu ograniczania erozji wodnej – sekcja została zaprojektowana w sposób

umożliwiający prowadzenie dalszych testów w tym zakresie. Uproszczenie układu pomiarowego może przyczynić się również do zmniejszenia końcowej ceny urządzenia. Naturalnym krokiem może być również wyposażenie maszyny w dozowniki nawozów płynnych oraz stałych.

9.8. Wariantowość zastosowań

Opracowane w ramach doktoratu urządzenie można znaleźć praktyczne zastosowanie w wielu różnych wariantach. Dywersyfikując produkt zapewniono możliwość jego pracy w charakterze stanowiska badawczego do testowania oraz identyfikowania obciążeń narzędzi rolniczych, które może być używane w tym celu komercyjnie – dzięki tej funkcji możliwe jest doświadczalne określanie parametrów pracy narzędzi.

Głównym zastosowaniem jest jednak używanie go jako narzędzia do wykonywania pielenia mechanicznego. Powielanie sekcji lub nawet samych narzędzi o zmiennej geometrii oraz stosowanie ich na pojazdach autonomicznych i nowoczesnych pielnikach rzędowych to główne założenia projektu. Urządzenie posiada możliwość łatwego przezbierania go pod różne standardy szerokości międzyrzędzi, dzięki zastosowaniu przesuwnych uchwytów narzędzi. Wspomniana modułowość polega również na możliwości stosowania standardowych narzędzi o stałych kątach skrawania (o geometrii dostosowanej do warunków polowych) lub innowacyjnych z możliwością zmiany geometrii. Urządzenie wyposażono również w układ korygowania wszystkich trzech narzędzi jednocześnie w celu umożliwienia formowania gleby na wzniesieniach zapewniając możliwość przeciwdziałania wypłukiwaniu gleby w czasie opadów.

Każda z opisanych funkcji maszyny z założenia stanowi integralny moduł, który może pracować w pełnym zestawie lub każdy osobno. Stanowisko badawcze w postaci mechatronicznej sekcji pielącej może być doposażone w dodatkowe czujniki pozwalające analizować inne parametry w celu odnoszenia ich do rejestrowanych obciążeń np. wilgotność gleby, a na podstawie zebranych danych prowadzić dalsze analizy.

9.9. Zgodności z polityką zrównoważonego rozwoju

Polityka zrównoważonego rozwoju to strategia, która dąży do równoważenia wzrostu gospodarczego, ochrony środowiska i dobrobytu społecznego. Celem tej polityki jest osiągnięcie trwałego rozwoju, który zaspokaja potrzeby obecnych pokoleń, nie ograniczając możliwości przyszłych do zaspokajania ich własnych potrzeb poprzez dbałość o środowisko naturalne oraz ograniczenia negatywnego wpływu na nie. Kluczowe aspekty zrównoważonego rozwoju w odniesieniu do przedmiotu doktoratu obejmują:

- ochronę środowiska – temat doktoratu dotyczy rozwoju metody pielęgnacji upraw tj. pielienia mechanicznego, które jest w pełni ekologiczne. Stosowanie jej jako zamiennika dla metod chemicznych powoduje rezygnację ze stosowania pestycydów oraz ogranicza zużycie wody potrzebnej do aplikowania środków ochrony roślin. Pielienie mechaniczne oprócz usuwania chwastów pozytywnie wpływa na ochronę przed nadmiernym parowaniem wody z gleby, które nasila się w szczególności w momentach występowania skorupy glebowej na powierzchni pól uprawnych.
- Efektywność energetyczną i redukcję zużycia zasobów – w pracy doktorskiej skupiono się na zwiększeniu efektywności energetycznej metody poprzez dostosowywanie kątów elementów skrawających do warunków glebowych. Takie podejście przekłada się jednocześnie na zmniejszenie zużycia energii potrzebnej do napędzania nośników narzędzi. Był to główny czynnik, który skłonił do podjęcia się tematu doktoratu – wydłużenie pracy autonomicznych pojazdów rolniczych, których baterie magazynujące energię elektryczną stanowią główny wykładnik ceny całego urządzenia. Wydłużenie czasu pracy na jednym ładowaniu akumulatorów lub na jednym tankowaniu zwiększa atrakcyjność i zasadność stosowania takich pojazdów w nowoczesnym rolnictwie.
- Zwiększoną trwałość całego urządzenia poprzez łatwą wymianę elementów eksploatacyjnych. Informowanie użytkownika o wielkości obciążeń może dodatkowo zapewnić możliwość podjęcia kroków korygujących w kierunku zmniejszenia obciążeń oraz zużywania się elementów skrawających.
- Zgodność z ideami rolnictwa zrównoważonego – wymienione wcześniej czynniki są składowymi rolnictwa zrównoważonego, które zakłada prowadzenie działalności rolniczej w sposób łączący produkcję żywności z troską o ochronę środowiska, dobrostan zwierząt oraz społeczno-ekonomiczne potrzeby rolników i lokalnych

społeczności. Celem rolnictwa zrównoważonego jest osiągnięcie długoterminowej równowagi między wydajnością produkcji a ochroną zasobów naturalnych i środowiska, tak aby zapewnić zdrową i bezpieczną żywność teraz i w przyszłości. Pielenie mechaniczne wpływa pozytywnie na strukturę powierzchniową gleby napowietrzając ją oraz regulując nadmierne parowanie zgromadzonej w niej wody niszcząc jednocześnie chwasty.

9.10. Podsumowanie i perspektywy wdrożeniowe

W ramach prowadzonych prac wdrożeniowych skupiono się przede wszystkim na przeanalizowaniu potrzeb końcowych klientów w odniesieniu do opracowanego rozwiązania. Ich identyfikacja na podstawie przytoczonych w rozdziale raportów rynku maszyn rolniczych, analizy SWOT, identyfikacji wczesnych klientów oraz kryteriów wyceny były wyznacznikami dla projektowanego w ramach doktoratu rozwiązania. Miały na celu ułatwienie późniejszego procesu wdrażania wyników badań. Kluczowym elementem prowadzonych prac wdrożeniowych była ochrona patentowa opracowanych rozwiązań z uwagi na ich dużą innowacyjność.

Przyjęta strategia komercjalizacji polegająca na udzielaniu licencji na opracowane w ramach doktoratu wdrożeniowego rozwiązania, otwiera szeroki wachlarz możliwości komercjalizacji poprzez współpracę z firmami działającymi na rynku maszyn rolniczych. Prowadzone badania wpisują się w trendy rolnictwa zarówno pod względem cyfryzacji, jak i propagowania metod zrównoważonej produkcji oraz mają szeroki zakres do dalszego rozwoju. Mogą być z powodzeniem adaptowane jako metoda do podobnych rozwiązań. Opracowana mechatroniczna sekcja pieląca oraz narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających dają możliwość prowadzenia dalszych badań w zakresie autonomizacji rozwiązania oraz opracowania algorytmów kształtujących powierzchnię gleby w celu przeciwdziałania erozji wodnej gleb.

10. Wnioski końcowe

10.1. Wnioski dotyczące hipotez pracy

Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, zgodnie z założoną hipotezą, że konstrukcja narzędzia w połączeniu z elementami automatyki umożliwią zmianę geometrii elementów skrawających glebę przy prędkościach do 10 km/h w celu zmniejszenia oporów skrawania gleby o co najmniej 10% w odniesieniu do narzędzia standardowego, zachowując poprawność procesu pod względem agrotechnicznym. Uzyskane wyniki dla wyznaczonych w badaniach kątów elementów skrawających glebę wskazują zmniejszenie obciążeń generowanych na zaprojektowanym narzędziu w zakresie od 23% do 95% w przypadku porównywania sił wypadkowych narzędzi oraz poprawę w zakresie od 47% do 119% w przypadku porównywania momentów wypadkowych.

Wykonana w ramach doktoratu mechatroniczna sekcja pieląca poprzez kinematykę oraz zastosowane czujniki i elementy wykonawcze w połączeniu z narzędziem o zmiennej geometrii umożliwia kształtowanie powierzchni gleby na wzniesieniach mając na uwadze przeciwdziałanie niszczącym skutkom erozji wodnej pól uprawnych, co potwierdza założoną hipotezę.

10.2. Wnioski poznawcze

Analiza wyników badań uzyskanych w realizowanym doktoracie wdrożeniowym pozwoliła na sformułowanie następujących kluczowych wniosków poznawczych:

- standardowe narzędzia pielące pracują stabilnie w prędkościach do około 4 km/h wykazując mniejsze fluktuacje obciążeń, ich rozkład jest znacznie bardziej równomierny jak dla prędkości zbliżonych do 8 km/h. Można na tej podstawie wnioskować, że obecnie powielana geometria narzędzi wymaga przeprojektowania pod maszyny umożliwiające pielenie z prędkościami powyżej ówczesnych maksymalnych prędkości pielienia, które wynoszą około 15 km/h.
- Wprowadzenie możliwości zmian geometrii elementów skrawających pozwala dostosować narzędzie do warunków występujących na polu oraz zmniejszyć obciążenia generowane przez narzędzie. Według uzyskanych wyników co najmniej o 20%.

- Dostosowując geometrię narzędzia pielącego do warunków polowych umożliwia się zmniejszanie obciążeń przy zwiększonej prędkości wykonywania pielenia – możliwe jest zwiększanie wydajności pielenia przy zmniejszaniu energochłonności procesu.
- Na podstawie uzyskanych wyników wyprowadzono zależności pomiędzy szacunkowymi obciążeniami narzędzi pielących, a prędkością pielenia dla obu badanych przypadków narzędzi, co umożliwia bardziej precyzyjne szacowanie zapotrzebowania mocy urządzeń.
- Kluczowym nastawnym parametrem geometrii mechatronicznego narzędzia pielącego jest kąt skrawania α .
- Wyznaczono zależność między kątami α i β mechatronicznego narzędzia pielącego a obciążeniami generowanymi w czasie pielenia na głębokości 30 mm.
- Kluczowymi składowymi obciążeń dającymi informacje o zachowaniu narzędzi, niezbędnymi do prowadzenia badań nad autonomizacją działania urządzenia są moment skręcający M_y , który odzwierciedla obciążenie od skrawania gleby i chwastów oraz składowa pionowa F_z , która informuje o prawidłowym zagłębianiu się narzędzia na założonej głębokości pielenia.
- W miarę prowadzonych testów zauważono, że dostosowując geometrię narzędzia w szczególności w przypadkach pielenia z prędkościami 8 km/h i większymi, że zmniejsza się w ten sposób zapylenie związane z rozrzucaaniem gleby przez narzędzie, zmniejszając tym samym erozję gleby.

10.3. Wnioski uytylitarne

Z uwagi na realizację doktoratu wdrożeniowego większość prowadzonych badań była ukierunkowana na zastosowanie ich w praktyce oraz komercjalizację. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła na sformułowanie następujących kluczowych wniosków uytylitarnych:

- Zdobyta wiedza na temat wpływu geometrii elementów skrawających narzędzia pielącego na obciążenia może prowadzić do jego adaptacji na pielnikach automatycznych ciągnionych przez ciągniki lub w szczególności na autonomicznych robotach polowych wydłużając w ten sposób wykonywanie zabiegu agrotechnicznego na jednym tankowaniu lub ładowaniu baterii.

- Dostosowując geometrię narzędzia do warunków glebowych możliwe jest wykonywanie pielenia przy prędkościach powyżej 5 km/h uzyskując stabilne warunki pracy, jednocześnie ograniczając obciążenia narzędzi.
- Wyposażenie sekcji pielącej w czujniki obciążeń w połączeniu z sygnałem położenia geograficznego daje możliwość wnioskowania w przybliżonym stopniu o typach oraz strukturze gleby, co jest zgodne z założeniami rolnictwa precyzyjnego.
- Zaprojektowana kinematyka urządzenia daje możliwość prowadzenia badań nad sposobami kształtowania powierzchni pól uprawnych w celu przeciwdziałania erozji wodnej gleby, w szczególności na wzniesieniach terenu.
- Stosując od czoła narzędzia wymienne dłuto, możliwe jest wydłużenie jego czasu pracy poprzez wymianę jedynie elementów eksploatacyjnych, zapewniając również możliwość dostosowywania jego geometrii do warunków glebowych.
- Siłownik hydrauliczny do regulacji kąta γ może spełniać również rolę zabezpieczenia narzędzi przed przeciążeniem.
- Do analizowania parametrów procesu pielenia możliwe jest uproszczenie układu pomiarowego do pomiarów składowych M_y oraz F_z z uwagi na niewielki wpływ trajektorii jazdy na generowane przez narzędzia obciążenia.
- Automatyczna zmiana kątów skrawania gleby w uproszczeniu może sprowadzać się do sterowania kątem skrawania α z zachowaniem wzajemnej równoległości elementów skrawających w płaszczyźnie kąta β , co pozwoli uprościć konstrukcję narzędzia.

10.4. Wnioski dotyczące dalszych badań

Na podstawie uzyskanych wyników zidentyfikowano kierunki, które mogą stanowić podstawę do kontynuacji badań w przyszłości w zakresie:

- autonomicznego nastawiania kątów elementów skrawających glebę w narzędziu mechatronicznym, poprzez opracowanie regulatora analizującego obciążenia z czujników, będzie to wymagało dalszych badań polowych w zróżnicowanych warunkach glebowych, celem zebrania danych do wykorzystania w procesie uczenia maszynowego,
- prowadzenie badań w zakresie opracowania narzędzia o stałej geometrii uwzględniającego kryterium stabilności pracy oraz wielkości generowanych obciążeń

- przy prędkościach pielenia powyżej 5 km/h uwzględniając w szczególności zakresy prędkości 15 km/h i więcej, osiągane przez nowoczesne automatyczne pielniki,
- prowadzenie badań związanych z ograniczaniem skutków erozji wodnej gleb poprzez opracowanie algorytmów kształtujących powierzchnię pól uprawnych w szczególności na pochylonym terenie przy użyciu funkcji zapewnionych w mechatronicznej sekcji pielącej oraz dzięki narzędziu o zmiennej geometrii elementów skrawających.

11.LITERATURA

1. Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny to multidyscyplinarna jednostka naukowo-badawcza o międzynarodowej skali działania. [Internet]. Sieć Badawcza Łukasiewicz - Poznański Instytut Technologiczny. [cytowane 27 styczeń 2024]. Dostępne na: <https://pit.lukasiewicz.gov.pl/>
2. Komunikat Komisji Do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów Europejski Zielony Ład. Bruksela: Komisja Europejska; 2019 grudź. Report No.: COM(2019) 640 final.
3. Strategia „od pola do stołu” - Wspólna Polityka Rolna po 2020 roku - Portal Gov.pl [Internet]. Wspólna Polityka Rolna po 2020 roku. [cytowane 28 styczeń 2024]. Dostępne na: <https://www.gov.pl/web/wprpo2020/strategia-od-pola-do-stolu>
4. Strategia „od pola do stołu” na rzecz sprawiedliwego, zdrowego i przyjaznego dla środowiska systemu żywnościowego. Komisja Europejska; Report No.: COM(2020) 381 final.
5. WPR 2023–2027 - Komisja Europejska [Internet]. 2024 [cytowane 28 styczeń 2024]. Dostępne na: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-2023-27_pl
6. Najważniejsze cele polityczne WPR na lata 2023–2027 - Komisja Europejska [Internet]. 2024 [cytowane 28 styczeń 2024]. Dostępne na: https://agriculture.ec.europa.eu/common-agricultural-policy/cap-overview/cap-2023-27/key-policy-objectives-cap-2023-27_pl
7. Ekoschematy obszarowe - Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi - Portal Gov.pl [Internet]. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. [cytowane 28 styczeń 2024]. Dostępne na: <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/ekoschematy3>
8. Ekoschemat: Rolnictwo węglowe i zarządzanie składnikami odżywczymi - Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi - Portal Gov.pl [Internet]. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi. [cytowane 28 styczeń 2024]. Dostępne na: <https://www.gov.pl/web/rolnictwo/ekoschemat-rolnictwo-weglowe-i-zarzadzanie-skladnikami-odzywczyymi>
9. Rueda-Ayala V, Rasmussen J, Gerhards R. Mechanical Weed Control. W: Oerke EC, Gerhards R, Menz G, Sikora RA, redaktorzy. Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity [Internet]. Dordrecht: Springer Netherlands; 2010 [cytowane 4 luty 2024]. s. 279–94. Dostępne na: https://link.springer.com/10.1007/978-90-481-9277-9_17
10. Zawada M, Legutko S, Szczepaniak J, Rogacki R, Wojciechowski J, Szymczyk S. Possibilities of using automatic systems for correcting the position of working units of tools including soil cultivation. MATEC Web Conf. 2021;(08010).

11. weedscience.org [Internet]. [cytowane 4 maj 2024]. Dostępne na: <https://www.weedscience.org/home.aspx>
12. Knezevic SZ, Jhala A, Gaines T. Herbicide Resistance and Molecular Aspects. W: Encyclopedia of Applied Plant Sciences [Internet]. Elsevier; 2017 [cytowane 4 maj 2024]. s. 455–8. Dostępne na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123948076000253>
13. Ahmad T, Jabran K, Moss SR. Alopecurus myosuroides. W: Biology and Management of Problematic Crop Weed Species [Internet]. Elsevier; 2021 [cytowane 4 maj 2024]. s. 1–19. Dostępne na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128229170000033>
14. Pantović JG, Sečanski M. Weed Control in Organic Farming. Contemp Agric. 1 czerwiec 2022;72(1–2):43–56.
15. Żywność Ekologiczna w Polsce Raport 2021. Warszawa: Koalicja na rzecz BIO we współpracy z NielsenIQ; 2021.
16. Raport o stanie rolnictwa ekologicznego w Polsce w latach 2021-2022. Warszawa: Główny Inspektorat Jakości Handlowej Artykułów Rolno-Spożywczych; 2023.
17. Halberg N. Assessment of the environmental sustainability of organic farming: Definitions, indicators and the major challenges. Can J Plant Sci. listopad 2012;92(6):981–96.
18. Polskie Stowarzyszenie Zrównoważonego Rolnictwa i Żywności [Internet]. Rolnictwo zrównoważone - Polskie Stowarzyszenie Zrównoważonego Rolnictwa i Żywności. [cytowane 5 maj 2024]. Dostępne na: <https://rolnictwozrownowazone.pl/rolnictwo-zrownowazone/co-to-jest-rolnictwo-zrownowazone/definicja/>
19. Dönmez D, Isak MA, İzgü T, Şimşek Ö. Green Horizons: Navigating the Future of Agriculture through Sustainable Practices. Sustainability. 22 kwiecień 2024;16(8):3505.
20. Keeney D. Sustainable Agriculture: Definition and Concepts. J Prod Agric. lipiec 1990;3(3):281–5.
21. Kasemi R, Lammer L, Vincze M. The gap between technology and agriculture, barrier identification and potential solution analysis. IFAC-Pap. 2022;55(39):314–8.
22. Barnes AP, Soto I, Eory V, Beck B, Balafoutis A, Sánchez B, i in. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. Land Use Policy. styczeń 2019;80:163–74.
23. Oliveira LFP, Moreira AP, Silva MF. Advances in Agriculture Robotics: A State-of-the-Art Review and Challenges Ahead. Robotics. 24 marzec 2021;10(2):52.
24. Ekielski A, Wesołowski K. Systemy agrotechniczne. Toruń: Polska Izba Gospodarcza Maszyn i Urządzeń Rolniczych; 2019. 338 s.

25. Walaszczyk A. Innowacja w zarządzaniu i inżynierii produkcji. Systemy informacyjne w rolnictwie precyzyjnym. Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją; 2012.
26. Lisowski A. Techniki rolnictwa precyzyjnego - E-pole [Internet]. e-pole.pl. [cytowane 27 styczeń 2024]. Dostępne na: <https://www.e-pole.pl/publikacje/uprawy/techniki-rolnictwa-precyzyjnego>
27. Braun A, Colangelo E, Steckel T. Farming in the Era of Industrie 4.0. CIRP. 2018;(72):979–84.
28. Digitalise your farming with 365FarmNet [Internet]. 365FarmNet. [cytowane 27 styczeń 2024]. Dostępne na: <https://www.365farmnet.com/en/>
29. Emmi L, Gonzalez-de-Soto M, Pajares G, Gonzalez-de-Santos P. New Trends in Robotics for Agriculture: Integration and Assessment of a Real Fleet of Robots. Sci World J. 2014;2014:1–21.
30. Ditzler CA, Hempel J. Soil Taxonomy and Soil Classification. W: Richardson D, Castree N, Goodchild MF, Kobayashi A, Liu W, Marston RA, redaktorzy. International Encyclopedia of Geography [Internet]. 1. wyd. Wiley; 2017 [cytowane 5 sierpień 2024]. s. 1–15. Dostępne na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118786352.wbieg0347>
31. Schad P. The International Soil Classification System WRB, Third Edition, 2014. W: Mueller L, Sheudshen AK, Eulenstein F, redaktorzy. Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2016 [cytowane 5 sierpień 2024]. s. 563–71. (Springer Water). Dostępne na: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-24409-9_25
32. Schad P. World Reference Base for Soil Resources—Its fourth edition and its history. J Plant Nutr Soil Sci. kwiecień 2023;186(2):151–63.
33. Kabała C. Systematyka Gleb Polski - Stan Aktualny i Dalszy Rozwój. Soil Sci Annu. 29 październik 2014;65(2):91–8.
34. Buckman H, Brady N. Gleba i jej właściwości. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne; 1971.
35. Bernacki H, Haman J, Kanafojski Cz. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. T. I. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne; 1967.
36. Brady NC, Weil RR. The nature and properties of soils. Fifteenth edition, global edition. Harlow, England London New York: Pearson; 2016. 1104 s. (Pearson global edition).
37. McKyes E. Soil cutting and tillage. Amsterdam Oxford New York [etc.]: Elsevier; 1985. (Developments in agricultural engineering).
38. Bernacki H. Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych. T. 1, Cz. 1 i 2, Narzędzia i maszyny uprawowe. Wyd. 2. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne; 1981.

-
39. Pimentel D. Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. *Environ Dev Sustain.* luty 2006;8(1):119–37.
 40. Morgan RPC. Soil erosion and conservation. 3rd ed. Malden, MA: Blackwell Pub; 2005. 304 s.
 41. Borrelli P, Robinson DA, Fleischer LR, Lugato E, Ballabio C, Alewell C, i in. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nat Commun.* 8 grudzień 2017;8(1):2013.
 42. Hua T, Zhao W, Liu Y, Liu Y. Influencing factors and their interactions of water erosion based on yearly and monthly scale analysis: A case study in the Yellow River basin of China [Internet]. 2019 [cytowane 12 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://nhess.copernicus.org/preprints/nhess-2019-122/>
 43. Piкуła D. Materia organiczna istotnym elementem żyzności gleb [Internet]. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa Państwowy Instytut Badawczy; 2020 [cytowane 12 sierpień 2024]. Dostępne na: http://www.iung.pulawy.pl/sir/zeszyt63_7.pdf
 44. Talarczyk W. Analiza możliwości zmian technologicznych i technicznych w uprawie roli w aspekcie poprawy gospodarki wodnej gleby i złagodzenia skutków ekstremalnych zjawisk pogodowych wynikających ze zjawiska globalnego ocieplenia. Poznań; Report No.: PIMR-8498.
 45. Abu-Awwad AM. Water infiltration and redistribution within soils affected by a surface crust. *J Arid Environ.* październik 1997;37(2):231–42.
 46. Vos H, Fister W, Eckardt F, Palmer A, Kuhn N. Physical Crust Formation on Sandy Soils and Their Potential to Reduce Dust Emissions from Croplands. *Land.* 8 grudzień 2020;9(12):503.
 47. Hu Y, Fister W, Kuhn N. Temporal Variation of SOC Enrichment from Interrill Erosion over Prolonged Rainfall Simulations. *Agriculture.* 23 październik 2013;3(4):726–40.
 48. Le Bissonnais Y, Renaux B, Delouche H. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *CATENA.* czerwiec 1995;25(1–4):33–46.
 49. Govers G, Vandaele K, Desmet P, Poesen J, Bunte K. The role of tillage in soil redistribution on hillslopes. *Eur J Soil Sci.* grudzień 1994;45(4):469–78.
 50. Van Oost K, Govers G, Desmet P. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landsc Ecol.* 2000;15(6):577–89.
 51. Hamza MA, Anderson WK. Soil compaction in cropping systems. *Soil Tillage Res.* czerwiec 2005;82(2):121–45.
 52. Verbist K, Cornelis WM, Schiettecatte W, Oltenfreiter G, Van Meirvenne M, Gabriels D. The influence of a compacted plow sole on saturation excess runoff. *Soil Tillage Res.* październik 2007;96(1–2):292–302.

53. Bagagiolo G, Biddoccu M, Rabino D, Cavallo E. Effects of rows arrangement, soil management, and rainfall characteristics on water and soil losses in Italian sloping vineyards. *Environ Res.* październik 2018;166:690–704.
54. Herout M, Koukoliček J, Kincl D, Pazderů K, Tomášek J, Urban J, i in. Impacts of technology and the width of rows on water infiltration and soil loss in the early development of maize on sloping lands. *Plant Soil Environ.* 31 październik 2018;64(10):498–503.
55. Wang J, Shi X, Li Z, Zhang Y, Liu Y, Peng Y. Responses of runoff and soil erosion to planting pattern, row direction, and straw mulching on sloped farmland in the corn belt of northeast China. *Agric Water Manag.* lipiec 2021;253:106935.
56. Mehla MK, Kothari M, Singh PK, Bhakar SR, Yadav KK. Optimization of virtual water flows in agriculture by changing cropping patterns using an integrated approach. *Heliyon.* grudzień 2023;9(12):e22603.
57. Łaszczyk B, Pokrzywka B, Regulski S, Zapendowski F. *Maszyny rolnicze. II.* Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne; 1978.
58. Niewiadomski W. *Podstawy agrotechniki.* Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne; 1971.
59. Zarzecka K, Gugęła M, Baranowska A. Zawartość i pobranie azotu, fosforu i potasu przez chwasty w uprawie ziemniaka w warunkach zróżnicowanych zabiegów agrotechnicznych. *Biul Inst Hod Aklim Roślin.* 31 marzec 2010;(255):77–84.
60. Horvath DP, Clay SA, Swanton CJ, Anderson JV, Chao WS. Weed-induced crop yield loss: a new paradigm and new challenges. *Trends Plant Sci.* maj 2023;28(5):567–82.
61. DoliJanoviC Z, RoljeviĆ NiKoliĆ S, Kovačević D, MiOdragoviĆ R, Kovačević A. Effect of Fertilization on Weed Infestation, Morphological and Productive Traits of Different Alternative Small Grains. *Tarım Bilim Derg.* 4 grudzień 2020;406–14.
62. Stephens RJ. Effects of Weed Infestation on Crop Yield and Quality. W: *Theory and Practice of Weed Control* [Internet]. London: Macmillan Education UK; 1982 [cytowane 2 sierpień 2024]. s. 1–14. Dostępne na: http://link.springer.com/10.1007/978-1-349-86066-1_1
63. Kubiak A, Wolna-Maruwka A, Niewiadomska A, Pilarska AA. The Problem of Weed Infestation of Agricultural Plantations vs. the Assumptions of the European Biodiversity Strategy. *Agronomy.* 30 lipiec 2022;12(8):1808.
64. Boydston RA, Vaughn SF. Alternative Weed Management Systems Control Weeds in Potato (*Solanum tuberosum*)¹. *Weed Technol.* styczeń 2002;16(1):23–8.
65. Chețan F, Rusu T, Chețan C, Urdă C, Rezi R, Șimon A, i in. Influence of Soil Tillage Systems on the Yield and Weeds Infestation in the Soybean Crop. *Land.* 1 październik 2022;11(10):1708.

-
66. Hofmeijer M, Krauss M, Berner A, Peigné J, Mäder P, Armengot L. Effects of Reduced Tillage on Weed Pressure, Nitrogen Availability and Winter Wheat Yields under Organic Management. *Agronomy*. 8 kwiecień 2019;9(4):180.
67. Kunz C, Weber J, Gerhards R. Benefits of Precision Farming Technologies for Mechanical Weed Control in Soybean and Sugar Beet—Comparison of Precision Hoeing with Conventional Mechanical Weed Control. *Agronomy*. 23 kwiecień 2015;5(2):130–42.
68. Kotlánová B, Hledík P, Hudec S, Martínez Barroso P, Vaverková MD, Jiroušek M, i in. The Influence of Sugar Beet Cultivation Technologies on the Intensity and Species Biodiversity of Weeds. *Agronomy*. 18 luty 2024;14(2):390.
69. Machleb J, Peteinatos GG, Sökefeld M, Gerhards R. Sensor-Based Intrarow Mechanical Weed Control in Sugar Beets with Motorized Finger Weeders. *Agronomy*. 29 lipiec 2021;11(8):1517.
70. Zeng Z, Martin A, Chen Y, Ma X. Weeding performance of a spring-tine harrow as affected by timing and operational parameters. *Weed Sci.* marzec 2021;69(2):247–56.
71. Spaeth M, Schumacher M, Gerhards R. Comparing Sensor-Based Adjustment of Weed Harrowing Intensity with Conventional Harrowing under Heterogeneous Field Conditions. *Agronomy*. 12 sierpień 2021;11(8):1605.
72. Jabran K, Chauhan BS. Non-chemical weed control. London: Academic press; 2018.
73. Gronle A, Lux G, Böhm H, Schmidtke K, Wild M, Demmel M, i in. Effect of ploughing depth and mechanical soil loading on soil physical properties, weed infestation, yield performance and grain quality in sole and intercrops of pea and oat in organic farming. *Soil Tillage Res.* maj 2015;148:59–73.
74. Vats S. Herbicides: History, Classification and Genetic Manipulation of Plants for Herbicide Resistance. W: Lichtfouse E, redaktor. *Sustainable Agriculture Reviews* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2015 [cytowane 4 sierpień 2024]. s. 153–92. (Sustainable Agriculture Reviews; t. 15). Dostępne na: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-09132-7_3
75. Sherwani SI, Arif IA, Khan HA. Modes of Action of Different Classes of Herbicides. W: Price A, Kelton J, Sarunaite L, redaktorzy. *Herbicides, Physiology of Action, and Safety* [Internet]. InTech; 2015 [cytowane 2 sierpień 2024]. Dostępne na: <http://www.intechopen.com/books/herbicides-physiology-of-action-and-safety/modes-of-action-of-different-classes-of-herbicides>
76. Jablonkai I. Molecular Mechanism of Action of Herbicides. W: Hasaneen MN, redaktor. *Herbicides - Mechanisms and Mode of Action* [Internet]. InTech; 2011 [cytowane 2 sierpień 2024]. Dostępne na: <http://www.intechopen.com/books/herbicides-mechanisms-and-mode-of-action/molecular-mechanism-of-action-of-herbicides>

77. Duke SO. Overview of herbicide mechanisms of action. *Environ Health Perspect.* lipiec 1990;87:263–71.
78. Podział herbicydów - rodzaje, klasyfikacja i zakres stosowania [Internet]. [cytowane 4 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://www.agro.basf.pl/pl/serwisy/z-praktyki-dla-praktykow/Podzia%C5%82-herbicyd%C3%B3w-rodzaje-klasyfikacja-i-zakres-stosowania/>
79. Using the sun to kill weeds and prepare garden plots [Internet]. [cytowane 2 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://extension.umn.edu/planting-and-growing-guides/solarization-occultation>
80. Zhang H, Cao D, Zhou W, Currie K. Laser and optical radiation weed control: a critical review. *Precis Agric.* sierpień 2024;25(4):2033–57.
81. Brodie G, Ryan C, Lancaster C. Microwave Technologies as Part of an Integrated Weed Management Strategy: A Review. *Int J Agron.* 2012;2012:1–14.
82. Carlesi S, Martelloni L, Bigongiali F, Frascioni C, Fontanelli M, Bàrberi P. Effects of band steaming on weed control, weed community diversity and composition and yield in organic carrot at three Mediterranean sites. *Weed Res.* październik 2021;61(5):385–95.
83. link G, Facebook, Twitter, Pinterest, Email, Apps O. Using a Flame Weeder in Vegetable and Fruit Crops [Internet]. 2019 [cytowane 2 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://blog-fruit-vegetable-ipm.extension.umn.edu/2019/01/using-flame-weeder-in-vegetable-and.html>
84. Borowy A, Kapłań M. Effects of lightless tillage, flame weeding and glufosinate-ammonium on weed suppression in summer savory (*Satureja hortensis* L.). *Acta Sci Pol Hortorum Cultus.* 29 kwiecień 2022;21(2):19–34.
85. Brodie G. Controlling Weeds with Microwave Energy. W: Horikoshi S, Brodie G, Takaki K, Serpone N, redaktorzy. *Agritech: Innovative Agriculture Using Microwaves and Plasmas* [Internet]. Singapore: Springer Singapore; 2022 [cytowane 2 sierpień 2024]. s. 111–31. Dostępne na: https://link.springer.com/10.1007/978-981-16-3891-6_8
86. Slaven MJ, Koch M, Borger CPD. Exploring the potential of electric weed control: a review. *Weed Sci.* wrzesień 2023;71(5):403–21.
87. Vigneault C, Benoît DL. Electrical Weed Control: Theory and Applications. W: Vincent C, Panneton B, Fleurat-Lessard F, redaktorzy. *Physical Control Methods in Plant Protection* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2001 [cytowane 2 sierpień 2024]. s. 174–88. Dostępne na: http://link.springer.com/10.1007/978-3-662-04584-8_12
88. Andreassen C, Vlassi E, Salehan N. Laser weeding: opportunities and challenges for couch grass (*Elymus repens* (L.) Gould) control. *Sci Rep.* 15 maj 2024;14(1):11173.

89. Cederlund H, Börjesson E. Hot foam for weed control—Do alkyl polyglucoside surfactants used as foaming agents affect the mobility of organic contaminants in soil? *J Hazard Mater.* sierpień 2016;314:312–7.
90. Martelloni L, Frascioni C, Sportelli M, Fontanelli M, Raffaelli M, Peruzzi A. The Use of Different Hot Foam Doses for Weed Control. *Agronomy.* 28 sierpień 2019;9(9):490.
91. Peerzada AM, Chauhan BS. Thermal Weed Control: History, Mechanisms, and Impacts. W: *Non-Chemical Weed Control* [Internet]. Elsevier; 2018 [cytowane 3 sierpień 2024]. s. 9–31. Dostępne na: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128098813000024>
92. Melander B, Liebman M, Davis AS, Gallandt ER, Bärberi P, Moonen A, i in. *Non-Chemical Weed Management*. W: Hatcher PE, Froud-Williams RJ, redaktorzy. *Weed Research* [Internet]. 1. wyd. Wiley; 2017 [cytowane 3 sierpień 2024]. s. 245–70. Dostępne na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781119380702.ch9>
93. Dreszer KA, Pawłowski T, Szczepaniak J, Szymanek M, Tanaś W, redaktorzy. *Maszyny rolnicze*. Wydanie 3., zmienione. Poznań: Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych; 2015. 349 s.
94. Zimny L. Definicje i podziały systemów rolniczych. *Acta Agrophysica.* 2007;10(2):507–18.
95. Zawada M, Legutko S, Gościańska-Łowińska J, Szymczyk S, Nijak M, Wojciechowski J, i in. Mechanical Weed Control Systems: Methods and Effectiveness. *Sustainability.* 24 październik 2023;15(21):15206.
96. Lorencowicz E. *Poradnik użytkownika techniki rolniczej w tabelach*. Wyd. 3. Bydgoszcz: Agencja Promocji Rolnictwa i Agrobiznesu „Apra”: Rolniczy Przegląd Techniczny; 2002. 107 s.
97. Bowman G. *Steel in the field: a farmer’s guide to weed management tools*. 2. wyd. Sustainable Agriculture Network handbook series (USA); 1997.
98. Bručienė I, Buragienė S, Šarauskis E. Weeding Effectiveness and Changes in Soil Physical Properties Using Inter-Row Hoeing and a Robot. *Agronomy.* 24 czerwiec 2022;12(7):1514.
99. Wiltshire JJJ, Tillett ND, Hague T. Agronomic evaluation of precise mechanical hoeing and chemical weed control in sugar beet. *Weed Res.* sierpień 2003;43(4):236–44.
100. Kunz C, Weber JF, Peteinatos GG, Sökefeld M, Gerhards R. Camera steered mechanical weed control in sugar beet, maize and soybean. *Precis Agric.* sierpień 2018;19(4):708–20.
101. Peruzzi A, Martelloni L, Frascioni C, Fontanelli M, Pirchio M, Raffaelli M. Machines for non-chemical intra-row weed control in narrow and wide-row crops: a review. *J Agric Eng.* 1 czerwiec 2017;48(2):57.
102. EC-weeder [Internet]. 2022 [cytowane 16 lipiec 2022]. Dostępne na: <https://www.steketee.com/producten/ec-weeder/>

-
103. K.U.L.T. iVision [Internet]. 2022 [cytowane 16 lipiec 2022]. Dostępne na: <https://www.kult-kress.de/en/produkte/K.U.L.T.iVision-SV.php>
104. CULTI cam [Internet]. 2022 [cytowane 16 lipiec 2022]. Dostępne na: <https://www.claas-group.com/press-corporate-communications/press-releases/claas-wins-one-gold-and-four-silver-medals/1335418>
105. Saile M, Spaeth M, Gerhards R. Evaluating Sensor-Based Mechanical Weeding Combined with Pre- and Post-Emergence Herbicides for Integrated Weed Management in Cereals. *Agronomy*. 18 czerwiec 2022;12(6):1465.
106. Jiao J, Wang Z, Luo H, Chen G, Liu H, Guan J, i in. Development of a mechanical weeder and experiment on the growth, yield and quality of rice. *Int J Agric Biol Eng*. 2022;15(3):92–9.
107. Melander B, McCollough MR. *Advances in Mechanical Weed Control Technologies*. UK: Burleigh Dodds Science Publishing; Cambridge; 2021.
108. Oprysk podczas pielenia [Internet]. 2022 [cytowane 16 lipiec 2022]. Dostępne na: <https://www.farmer.pl/technika-rolnicza/maszyny-rolnicze/oprysk-podczas-pielenia>
109. Horsch [Internet]. 2023 [cytowane 18 czerwiec 2023]. Dostępne na: <https://www.horsch.com>
110. Home M, Tillett N, Hague T, Godwin R. An experimental study of lateral positional accuracy achieved during inter-row cultivation. W Pisa, Italy; 2002. s. 101–10.
111. Tillett ND, Hague T, Miles SJ. Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet. *Comput Electron Agric*. marzec 2002;33(3):163–77.
112. Griepentrog HW, Noerremark M, Nielsen J, Ibarra JS. Autonomous Inter-Row Hoeing using GPS-based side-shift control. W IX, Manuscript ATOE 07 005; 2007.
113. Åstrand B, Baerveldt AJ. An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for Mechanical Weed Control. *Auton Robots*. 2002;13(1):21–35.
114. Gerhards R, Andújar Sanchez D, Hamouz P, Peteinatos GG, Christensen S, Fernandez-Quintanilla C. Advances in site-specific weed management in agriculture—A review. *Weed Res*. kwiecień 2022;62(2):123–33.
115. ROW-GUARD [Internet]. Einböck. [cytowane 3 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://www.einboeck.at/en/products/crop-care/accessories-for-hoes/row-guard>
116. Maschinenfabrik Schmotzer GmbH [Internet]. [cytowane 1 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://schmotzer.de/en/>
117. Garford Farm Machinery Ltd | Precision Guided Hoes & InRow Weeders [Internet]. Garford Farm Machinery. [cytowane 1 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://garford.com/>

-
118. Kanafojski C. Narzędzia i maszyny rolnicze. Opis, teoria i zarys konstrukcji. T. I. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne; 1956.
119. Oñate E, Idelsohn SR, Del Pin F, Aubry R. THE PARTICLE FINITE ELEMENT METHOD — AN OVERVIEW. *Int J Comput Methods*. wrzesień 2004;01(02):267–307.
120. Leon Bal AR, Meschke G. Two-phase model for the excavation analysis in partially saturated soft soils using the particle finite element method. *Int J Numer Anal Methods Geomech*. luty 2023;47(2):145–86.
121. Salazar F, Irazábal J, Larese A, Oñate E. Numerical modelling of landslide-generated waves with the particle finite element method (PFEM) and a non-Newtonian flow model: NUMERICAL MODELLING OF LANDSLIDE-GENERATED WAVES PFEM NON-NEWTONIAN. *Int J Numer Anal Methods Geomech*. 25 kwiecień 2016;40(6):809–26.
122. Jin X, Ma F, Wang D, Zhu Z. Simulation of Mouldboard Plough Soil Cutting Based on Smooth Particle Hydrodynamics Method and FEM–SPH Coupling Method. *Agriculture*. 21 wrzesień 2023;13(9):1847.
123. Major T, Csanády V. Combined FEM-SPH Simulation Method for the Modeling of the Interaction of Tillage Tools and the Soil. *Erd Közlemények*. 2015;5(1):7–19.
124. Coetzee CJ, Els DNJ. Calibration of granular material parameters for DEM modelling and numerical verification by blade–granular material interaction. *J Terramechanics*. luty 2009;46(1):15–26.
125. Shmulevich I. State of the art modeling of soil–tillage interaction using discrete element method. *Soil Tillage Res*. grudzień 2010;111(1):41–53.
126. Zhang F, Damjanac B, Furtney J. Introduction to the Discrete Element Method (DEM). W: *Coupled Thermo-Hydro-Mechanical Processes in Fractured Rock Masses* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2023 [cytowane 6 sierpień 2024]. s. 1–27. Dostępne na: https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-25787-2_1
127. Walunj A, Chen Y, Tian Y, Zeng Z. Modeling Soil–Plant–Machine Dynamics Using Discrete Element Method: A Review. *Agronomy*. 28 kwiecień 2023;13(5):1260.
128. Tekeste MZ, Balvanz LR, Hatfield JL, Ghorbani S. Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: Worn and hardened edges effects on soil-tool forces and soil flow. *J Terramechanics*. kwiecień 2019;82:1–11.
129. Zeng Z, Chen Y. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction. *Biosyst Eng*. kwiecień 2019;180:25–35.
130. Shmulevich I, Asaf Z, Rubinstein D. Interaction between soil and a wide cutting blade using the discrete element method. *Soil Tillage Res*. listopad 2007;97(1):37–50.
131. Taghavifar H, Mardani A. Application of artificial neural networks for the prediction of traction performance parameters. *J Saudi Soc Agric Sci*. styczeń 2014;13(1):35–43.

-
132. Wang X, Fang W, Han D, Chen X. Review of the Research on Soil Disturbance by Tools. *Appl Sci.* 27 grudzień 2022;13(1):338.
133. Mardani A, Golanbari B. Indoor measurement and analysis on soil-traction device interaction using a soil bin. *Sci Rep.* 2 maj 2024;14(1):10077.
134. Zhang G, Liang D, Zhang JM. Image analysis measurement of soil particle movement during a soil–structure interface test. *Comput Geotech.* czerwiec 2006;33(4–5):248–59.
135. Pásthly L, Szabó B, Tamás K. Measuring and modelling of soil displacement from a horizontal penetrometer and a sweep using an IMU sensor fusion and DEM. *Soil Tillage Res.* grudzień 2024;244:106207.
136. Chen W, Cao G, Yuan D, Ding Y, Zhu J, Chen X. Study on Agricultural Machinery-Load-Testing Technology and Equipment Based on Six-Dimensional Force Sensor. *Agriculture.* 22 sierpień 2023;13(9):1649.
137. Hensh S, Tewari VK, Upadhyay G. An instrumentation system to measure the loads acting on the tractor PTO bearing during rotary tillage. *J Terramechanics.* sierpień 2021;96:1–10.
138. Kim YS, Kim WS, Baek SY, Baek SM, Kim YJ, Lee SD, i in. Analysis of Tillage Depth and Gear Selection for Mechanical Load and Fuel Efficiency of an Agricultural Tractor Using an Agricultural Field Measuring System. *Sensors.* 26 kwiecień 2020;20(9):2450.
139. Agüera J, Carballido J, Gil J, Gliever C, Perez-Ruiz M. Design of a Soil Cutting Resistance Sensor for Application in Site-Specific Tillage. *Sensors.* 10 maj 2013;13(5):5945–57.
140. Mojžiš M, Kosiba J, Jobbágy J. Comparative Measurement of Horizontal Penetrometry with a Focus on the Degree of Soil Compaction in Real Work Conditions. *AgriEngineering.* 11 kwiecień 2024;6(2):979–94.
141. Song W, Jiang X, Li L, Ren L, Tong J. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers. *Soil Tillage Res.* czerwiec 2022;220:105356.
142. Cviklovič V, Mojžiš M, Majdan R, Kollárová K, Tkáč Z, Abrahám R, i in. Data Acquisition System for On-the-Go Soil Resistance Force Sensor Using Soil Cutting Blades. *Sensors.* 15 lipiec 2022;22(14):5301.
143. Nobakht N, Askari M, Nikbakht AM, Ghorbani Z. Development of a Dynamometer to Measure All Forces and Moments Applied on Tillage Tools. *MAPAN.* grudzień 2017;32(4):311–9.
144. Askari M, Komarizade MH, Nikbakht AM, Nobakht N, Teimourlou RF. A novel three-point hitch dynamometer to measure the draft requirement of mounted implements. *Res Agric Eng.* 31 grudzień 2011;57(4):128–36.
145. Al-Jalil HF, Khdaif A, Mukahal W. Design and performance of an adjustable three-point hitch dynamometer. *Soil Tillage Res.* listopad 2001;62(3–4):153–6.

-
146. Li P, Ucgul M, Lee SH, Saunders C. A new method to analyse the soil movement during tillage operations using a novel digital image processing algorithm. *Comput Electron Agric.* styczeń 2019;156:43–50.
147. Feijoo F, Gomez-Gil FJ, Gomez-Gil J. Application of Composite Spectrum in Agricultural Machines. *Sensors.* 26 wrzesień 2020;20(19):5519.
148. Zhu L, Liao Q, Wang Z, Chen J, Chen Z, Bian Q, i in. Prediction of Soil Shear Strength Parameters Using Combined Data and Different Machine Learning Models. *Appl Sci.* 18 maj 2022;12(10):5100.
149. Pramanik M, Khanna M, Singh M, Singh DK, Sudhishri S, Bhatia A, i in. Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agric Technol.* grudzień 2022;2:100032.
150. Seyar MH, Ahamed T. Optimization of Soil-Based Irrigation Scheduling Through the Integration of Machine Learning, Remote Sensing, and Soil Moisture Sensor Technology. W: *IoT and AI in Agriculture* [Internet]. Singapore: Springer Nature Singapore; 2024 [cytowane 7 sierpień 2024]. s. 275–99. Dostępne na: https://link.springer.com/10.1007/978-981-97-1263-2_18
151. Ahmad AR, Wynn T, Lin CY. A Comprehensive Design of Six-Axis Force/Moment Sensor. *Sensors.* 30 czerwiec 2021;21(13):4498.
152. Pérez Ubeda R, Gutiérrez Rubert SC, Zotovic Stanisic R, Perles Ivars Á. Design and Manufacturing of an Ultra-Low-Cost Custom Torque Sensor for Robotics. *Sensors.* 1 czerwiec 2018;18(6):1786.
153. Sun Y, Liu Y, Zou T, Jin M, Liu H. Design and optimization of a novel six-axis force/torque sensor for space robot. *Measurement.* kwiecień 2015;65:135–48.
154. Wang Z, Zhang X, Li M. Accuracy Analysis and Experimental Study of a Six-Dimensional Force Sensor with Circular Flexible Spherical Joints. *Sensors.* 18 sierpień 2023;23(16):7247.
155. Musil J, Červinka J. Measuring of pulling resistance in machinery with passive working organs. *Res Agr Eng.* 2007;53(2):47–53.
156. Kiełbasa P. Pomiar wybranych parametrów eksploatacyjnych agregatu uprawowego. *Inż Rol.* 2007;11(7):79–86.
157. PLASTIC MOULD STEELS PREHARDENED CORROSION RESISTANT STEEL, M303 High Hard. Bohler; 2023.
158. Aydemir B, Kaluc E, Fank S. Influence of heat treatment on hysteresis error of force transducers manufactured from 17-4PH stainless steel. *Measurement.* grudzień 2006;39(10):892–900.
159. 1.2316 tool steel at Meusburger [Internet]. Meusburger Georg GmbH & Co KG; [cytowane 17 sierpień 2024]. Dostępne na: <https://www.meusburger.com/EN/US/>
-

160. Definiowanie wykresu jakości siatki [Internet]. Pomoc SOLIDWORKS. 2024. Dostępne na:
https://help.solidworks.com/2021/polish/solidworks/cworks/t_Plotting_Quality_Parameters_of_Mesh_Plots.htm
161. CEMA - European Agricultural Machinery - Home [Internet]. [cytowane 27 styczeń 2024]. Dostępne na: <https://www.cema-agri.org/>
162. European market for arable farm equipment: a picture full of contrasts. CEMA European Agricultural Machinery; 2016.
163. Positive Development for Arable Farming – Not All Segments Benefit. CEMA European Agricultural Machinery; 2018.
164. March 2021 - Industry in Europe completely in the boom. CEMA Business Barometer; 2021.
165. Szymanik E. Konkurencyjność przedsiębiorstwa - główne aspekty. Zesz Nauk Uniw Ekon W Krakowie. 2016;(5(953)):107–24.
166. Szmitka S. Analiza SWOT jako narzędzie oceny innowacyjności przedsięwzięcia biznesowego. Warm-Mazur Kwart Nauk. 2015;79–98.
167. Ingaldi M. Wykorzystanie analizy SWOT do określenia pozycji strategicznej przedsiębiorstwa poligraficznego. Zesz Nauk Qual Prod Improv. 2017;2(7):20–31.
168. Siuba P. Ile powinien kosztować nowy produkt? Mark Sprzedaż ICAN Inst. 2018;

12.SPIS RYSUNKÓW

<i>Rys. 2.1. Naprężenia w punkcie. Naprężenia główne oraz naprężenia normalne i styczne na nachylonej płaszczyźnie, a także graficzna postać kombinacji naprężeń normalnych i stycznych na płaszczyznach pod różnymi kątami [37]</i>	27
<i>Rys. 2.2. Ścinanie gleby pod jednolitymi naprężeniami oraz wykres prawa granicy wytrzymałości, w połączeniu z kołem Mohr'a [37]</i>	29
<i>Rys. 2.3. Schemat przyrządu trójosiowego do wyznaczania wartości c i ϕ, gdzie: 1 – próbka gleby, 2 – gumowy miech, 3 – filtr górny, 4 – filtr dolny, 5 – cylinder szklany, 6 – woda, 7 – sprężone powietrze, 8 – manometr, 9 – przewód do sprężarki [38]</i>	30
<i>Rys. 2.4. Wyznaczanie wartości c i ϕ przy użyciu metody koła Mohra – graficzna reprezentacja wyników par naprężeń σ_1 i σ_2 z przyrządu trójosiowego [38]</i>	31
<i>Rys. 2.5. Działanie klina płaskiego na glebę, gdzie: AB – klin, CD – płaszczyzna poślizgu pod kątem ω, a – grubość skrawanej warstwy gleby [38]</i>	32
<i>Rys. 2.6. Zmiana erozji gleby między 2001 a 2012 r zgodnie ze scenariuszem bazowym [41]</i>	34
Politechnika Poznańska – Wydział Inżynierii Mechanicznej	Rozprawa doktorska

<i>Rys. 2.7. Zmiana erozji gleby między 2001 a 2012 rokiem zgodnie ze scenariuszem ochronnym uwzględniającym praktyki mające ograniczać zjawisko [41]</i>	<i>35</i>
<i>Rys. 2.8. Typowe współczynniki infiltracji dla różnych gleb [40]</i>	<i>36</i>
<i>Rys. 2.9. Podział urządzeń rolniczych do uprawy gleby ze względu na sposób działania, [źródło: opracowanie własne]</i>	<i>46</i>
<i>Rys. 2.10. Autonomiczny robot polowy do siewu i pielęgnacji upraw szerokorzędowych [1] ..</i>	<i>48</i>
<i>Rys. 2.11. Przykładowa konfiguracja pielnika mechanicznego firmy Einboeck wyposażonego w system naprowadzania na rzędy roślin [115]</i>	<i>50</i>
<i>Rys. 2.12. Części robocze pielników: a, b – noże kątowe (lewe i prawe), c, d – gęsiostopki, e – ząb spulchniający z wymiennym radłem, f – dłuto [57]</i>	<i>52</i>
<i>Rys. 2.13. Schemat rozmieszczenia elementów roboczych w zespołach pielących [38]</i>	<i>52</i>
<i>Rys. 2.14. Konfiguracje ustawień elementów roboczych w sekcjach do pielienia mechanicznego [116]</i>	<i>53</i>
<i>Rys. 2.15. Konfiguracje ustawień elementów roboczych w sekcjach do pielienia mechanicznego [117]</i>	<i>53</i>
<i>Rys. 2.16. Zespół/sekcja pieląca z równoległobokiem przegubowym, gdzie: 1 – belka narzędziowa ramy głównej maszyny; 2 – uchwyt montażowy; 3 – równoległobok przegubowy z nastawnym wahaczem górnym; 4 – pręt wydźwigowy; 5 – podłużne ramię zespołu; 6 – ramię poprzeczne; 7 – koło podporowe [35,38]</i>	<i>54</i>
<i>Rys. 2.17. Siły działające na sekcję pielącą wyposażoną w równoległobok w dwóch konfiguracjach ustawienia: a – wahacze pochylone w dół, b – wahacze uniesione [35,38,118]</i>	<i>55</i>
<i>Rys. 2.18. Budowa noży kątowych w dwóch wariantach: a – z odchylonym nożem pionowym płaskim o kącie $\psi > 90^\circ$ [35,38]</i>	<i>56</i>
<i>Rys. 2.19. Rozwinięcie noża kąтового z ostrzem pionowym płaskim o kącie $\psi < 90^\circ$: a – rzut pionowy i poziomy wygiętego noża, b – geometria rozwinięcia blachy noża [35,38]</i>	<i>58</i>
<i>Rys. 2.20. Rozkład sił działających na ostrze gęsiostopki oraz sposoby ostrzenia go [118] ...</i>	<i>59</i>
<i>Rys. 2.21. Budowa geometryczna gęsiostopki, gdzie: 1 – element tnący, 2 – trzonek [35,38,57]</i>	<i>61</i>
<i>Rys. 2.22. Ząb sprężynowy kultywatora [118]</i>	<i>62</i>

Rys. 2.23. Zalety pielienia mechanicznego, gdzie: a - dostęp powietrza do korzeni poprzez usunięcie zaskorupienia gleby, b - przerwanie kapilarów glebowych powodujące zmniejszenie parowania wody z gleby w porze suchej, c - oczyszczenie z chwastów [10]	63
Rys. 2.24. Pielnik z wizyjnym systemem Culti Cam naprowadzania narzędzi na międzyrzędzia roślin [10]	64
Rys. 2.25. Automatyczny pielnik IC-Weeder firmy Steketee do pielienia międzyrzędzi i przestrzeni między roślinami w rzędzie [10]	65
Rys. 2.26. Automatyczny pielnik rotorowy opracowany przez Uniwersytet w Osnabrück we współpracy z Amazon Werke [10]: a - konstrukcja pielnika rotorowego, b - cykloida nakreślana przez narzędzia pielące	66
Rys. 2.27. Robocrop inrow firmy Garford - pielnik do pielęgnacji międzyrzędzi oraz przestrzeni między roślinami w rzędach [10]	67
Rys. 2.28. Cięcie gleby gładkim, szerokim ostrzem pionowym [37]	71
Rys. 2.29. Współczynniki N jako funkcja kąta wewnętrznego tarcia gleby ϕ dla gładkiego, szerokiego pionowego ostrza.	73
Rys. 2.30. Trójwymiarowy model cięcia gleby McKyesa i Ali, pokazujący siły i naciski działające na strefę centralną oraz elementarny segment o włączonym kącie $\delta\phi$ w bocznym półksiężycu [37]	74
Rys. 2.31. Teoria ścinania gleby narzędziem zaproponowana przez McKeyesa [37]	75
Rys. 2.32. Analiza 3D PFEM kontaktu narzędzia-gleba przy całkowicie nasyconym gruncie: Przestrzenny rozkład ciśnień porowych [Pa] w średnio gęstym piasku przy posuwie narzędzia $Sx = 360$ mm. (A) Modele 2D i (B) 3D PFEM [120]	77
Rys. 2.33. Odkształcenie gruntu podczas wydobywania początkowo w pełni nasyczonego gęstego piasku przy poziomym przemieszczeniu narzędzia wynoszącym $Sx = 250$ mm: (A) Eksperyment, (B) model obliczeniowy [120]	77
Rys. 2.34. Proces cięcia i opór cięcia gleby w oparciu o model SPH i sprzężony model FEM-SPH, gdzie: Model SPH: (a) $t = 0,74$ s, (b) $t = 2,02$ s, (c) $t = 3,78$ s; Model FEM-SPH: (d) $t = 0,74$ s, (e) $t = 2,02$ s, (f) $t = 3,78$ s [122]	78
Rys. 2.35. Przykłady modelowania typowych narzędzi uprawowych w badaniach SPMI: (a) gęsiostopa; (b) głębosz; (c) szeroki lemiesz tnący; (d) pług odkładnicowy; (e) lemiesz obrotowy; oraz (f) gęsiostopa w glebie z resztkami pożywnymi [127]	79

<i>Rys. 2.36. Przykładowy kanał glebowy do badań interakcji między urządzeniami rolniczymi a glebą [133]</i>	82
<i>Rys. 2.37. Przyrząd pomiarowy do eksperymentalnego badania obciążeń narzędzi w glebie [140]</i>	83
<i>Rys. 4.1. Szacunkowe opory pielenia mechanicznego w funkcji szerokości roboczej narzędzi</i>	91
<i>Rys. 4.2. Układ współrzędnych prototypowego 6 osiowego czujnika obciążeń</i>	92
<i>Rys. 4.3. Warunki wejściowe analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych – definicja obciążenia zewnętrznego.</i>	94
<i>Rys. 4.4. Warunki wejściowe analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych – definicja obciążenia zewnętrznego.</i>	95
<i>Rys. 4.5. Wykres jakości siatki wygenerowanej na potrzeby analizy wytrzymałościowej metodą elementów skończonych w programie SolidWorks 2022.</i>	96
<i>Rys. 4.6. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.</i>	97
<i>Rys. 4.7. Mapa przemieszczeń dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.</i>	97
<i>Rys. 4.8. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$, $F_y = 500\text{N}$, $F_z = 950\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.</i>	99
<i>Rys. 4.9. Mapa przemieszczeń dla przypadku obciążenia $F_x = 2000\text{N}$, $F_y = 500\text{N}$, $F_z = 950\text{N}$ na obciążeniu odległym 340mm.</i>	99
<i>Rys. 4.10. Zaproponowany układ pomiarowy wieloosiowego czujnika obciążeń składający się z 32 aktywnych tensometrów</i>	100
<i>Rys. 4.11. Stanowisko badawcze do weryfikacji działania i wstępnej kalibracji prototypów czujników, gdzie: 1 - czujnik referencyjny UTILCELL 650; 2 – prototyp czujnika; 3 – maszyna wytrzymałościowa HT-2402; 4 – pulpit do manualnej obsługi maszyny wytrzymałościowej; 5 – konfigurowalny uchwyt do zadawania obciążeń referencyjnych dla prototypowego czujnika; 6 – aparatura pomiarowa QuantumX CX22B-W; 7 – komputer do parametryzacji aparatury pomiarowej i wizualizacji danych.</i>	102
<i>Rys. 4.12. Konfigurowalny uchwyt do zadawania obciążeń referencyjnych dla prototypowego czujnika sześćoosiowego, gdzie: 1 – uchwyt badanego czujnika; 2 – czujnik referencyjny; 3 – maszyna wytrzymałościowa; 4 – konfigurowalny uchwyt czujnika; 5 – elementy przekazujące obciążenie; 6 – prototypowy czujnik.</i>	103

<i>Rys. 4.13. Stanowisko badawcze do kalibracji prototypowych czujników metodą macierzy odwrotnej, konfiguracja dla sił F_x i F_y, gdzie: 1 – obciążenie referencyjne; 2 – konfigurowalny uchwyt do zadawania obciążeń referencyjnych dla prototypowego czujnika; 3 – prototyp czujnika; 4 – aparatura pomiarowa QuantumX CX22B-W; 5 – komputer do parametryzacji aparatury pomiarowej i wizualizacji danych.....</i>	<i>104</i>
<i>Rys. 4.14. Stanowisko badawcze do kalibracji prototypowych czujników metodą macierzy odwrotnej, konfiguracja dla momentów M_x i M_y.</i>	<i>105</i>
<i>Rys. 4.15. Przykładowy przebieg sygnałów z poszczególnych mostków tensometrycznych czujnika</i>	<i>106</i>
<i>Rys. 4.16. Wartości siły F_x na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji</i>	<i>108</i>
<i>Rys. 4.17. Wartości siły F_y na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji</i>	<i>109</i>
<i>Rys. 4.18. Wartości siły F_z na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji</i>	<i>109</i>
<i>Rys. 4.19. Wartości momentu M_x na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji.....</i>	<i>110</i>
<i>Rys. 4.20. Wartości momentu M_y na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji.....</i>	<i>110</i>
<i>Rys. 4.21. Wartości momentu M_z na podstawie pomiarów prototypowym czujnikiem po kalibracji.....</i>	<i>111</i>
<i>Rys. 5.1. Narzędzie o zmiennej geometrii elementów skrawających, gdzie: 5 – ostrza skrawające glebę; 7 – wieosiowy czujnik obciążeń; 9,10 – napędy liniowe; 11 – cięgło kąta β; 12 – cięgło kąta α; 13 – wymienne dłuto.</i>	<i>115</i>
<i>Rys. 5.2. Skrajne, górne, ustawienie elementów skrawających glebę dla kąta α w narzędziu</i>	<i>116</i>
<i>Rys. 5.3. Skrajne, dolne, ustawienie elementów skrawających glebę dla kąta α w narzędziu</i>	<i>116</i>
<i>Rys. 5.4. Ustawienia elementów skrawających glebę dla kąta β w narzędziu, gdzie: a – skrajne górne ustawienie; b – ustawienie poziome względem płaszczyzny podłoża; c – skrajne dolne ustawienie.</i>	<i>117</i>
<i>Rys. 5.5. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia skrajnego działającego na układ w czasie pracy</i>	<i>118</i>

<i>Rys. 5.6. Mapa naprężeń Hubera-Misesa dla przypadku obciążenia skrajnego działającego na układ w czasie pracy</i>	<i>119</i>
<i>Rys. 5.7. Schemat kinematyki mechatronicznego narzędzia o zmiennej geometrii kątów elementów skrawających glebę.....</i>	<i>120</i>
<i>Rys. 5.8. Schemat kinematyki położenia suwaka prowadnicy liniowej napędu zmiany kąta skrawania α.....</i>	<i>121</i>
<i>Rys. 5.9. Schemat kinematyki położenia przegubu ostrza skrawającego dla zadanego położenia kąta β.....</i>	<i>122</i>
<i>Rys. 5.10. Schemat kinematyki położenia przegubu przy zadanych kątach: skrawania α i poprzecznego pochylenia noża β</i>	<i>123</i>
<i>Rys. 5.11. Model CAD mechatronicznej sekcji pielącej wyposażonej w narzędzie o zmiennej geometrii kątów skrawania gleby</i>	<i>124</i>
<i>Rys. 5.12. Mechatroniczna sekcja pieląca w pionowym ułożeniu narzędzi pielących z ustawieniem maksymalnej głębokości pielienia</i>	<i>125</i>
<i>Rys. 5.13. Mechatroniczna sekcja pieląca ze skrajnym, tylnym, położeniem narzędzi pielących z maksymalnym wysunięciem koła kopiującego</i>	<i>126</i>
<i>Rys. 5.14. Mechatroniczna sekcja pieląca ze skrajnym, przednim, położeniem narzędzi pielących z maksymalnym wysunięciem koła kopiującego</i>	<i>126</i>
<i>Rys. 6.1. Skrajne zakresy ruchów narzędzi pielących o kąt γ dla przypadku przyjętego kąta pochylenia podłoża</i>	<i>128</i>
<i>Rys. 6.2. Pionowe ustawienie narzędzi pielących względem przyjętego kąta pochylenia podłoża.....</i>	<i>129</i>
<i>Rys. 6.3. Pionowe ustawienie narzędzi pielących względem przyjętego kąta pochylenia podłoża z uwzględnioną korektą kąta skrawania α w narzędziu o zmiennej geometrii</i>	<i>130</i>
<i>Rys. 7.1. Autonomiczny robot polowy firmy Unia z napędami elektrycznymi z zamontowanym stanowiskiem badawczym</i>	<i>131</i>
<i>Rys. 7.2. Autonomiczny robot polowy firmy Unia z napędami elektrycznymi z zamontowanym stanowiskiem badawczym</i>	<i>132</i>
<i>Rys. 7.3. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii zamontowana na pojeździe autonomicznym.....</i>	<i>133</i>
<i>Rys. 7.4. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii zamontowana na pojeździe autonomicznym w konfiguracji z trzema narzędziami</i>	<i>134</i>

Rys. 7.5. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca, widok na elementy wykonawcze i pomiarowe	135
Rys. 7.6. Stanowisko badawcze – mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii zamontowana na pojeździe autonomicznym w konfiguracji z dwoma narzędziami	136
Rys. 7.7. Antena GPS zamontowana w środku geometrycznym autonomicznego robota	137
Rys. 7.8. Mobilny zestaw akwizycji danych z rejestratorem CX22-W oraz wzmacniaczami MX840B	138
Rys. 7.9. Penetrologger firmy Eijkelkamp do pomiaru oporów penetracji gleby oraz wilgotności w czasie badań na polu badawczym	139
Rys. 7.10. Wyniki pomiarów oporu penetracji gleby oraz wilgotności w początkowej części pola badawczego	140
Rys. 7.11. Wyniki pomiarów oporu penetracji gleby oraz wilgotności w środkowej części pola badawczego	141
Rys. 7.12. Wyniki pomiarów oporu penetracji gleby oraz wilgotności w końcowej części pola badawczego	141
Rys. 7.13. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 2	142
Rys. 7.14. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 2	143
Rys. 7.15. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 2	144
Rys. 7.16. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 3	145
Rys. 7.17. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 3	145
Rys. 7.18. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 3	146
Rys. 7.19. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 4	146
Rys. 7.20. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 4	147
Rys. 7.21. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 4	147

Rys. 7.22. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 5	148
Rys. 7.23. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 5.....	148
Rys. 7.24. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 5	149
Rys. 7.25. Siły F_x , F_y i F_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 6	150
Rys. 7.26. Momenty M_x , M_y i M_z dla obu wersji narzędzi w odniesieniu do prędkości jazdy – próba 6.....	150
Rys. 7.27. Przyspieszenia a_x , a_y i a_z dla obu wersji narzędzi – próba 6	151
Rys. 7.28. Uśrednione siły wypadkowe narzędzia standardowego w funkcji prędkości	152
Rys. 7.29. Uśrednione momenty wypadkowe narzędzia standardowego w funkcji prędkości.....	152
Rys. 7.30. Uśrednione siły wypadkowe narzędzia mechatronicznego w funkcji prędkości dla kątów: $\alpha = 1,14^\circ$ oraz $\beta = 0,82^\circ$	153
Rys. 7.31. Uśrednione momenty wypadkowe narzędzia mechatronicznego w funkcji prędkości dla kątów: $\alpha = 1,14^\circ$ oraz $\beta = 0,82^\circ$	154
Rys. 7.32. Średnie siły wypadkowe narzędzia mechatronicznego w funkcji kątów α i β oraz uśrednionych sił wypadkowych F_w	155
Rys. 7.33. Zależność kątów α i β oraz uśrednionych sił wypadkowych F_w dla narzędzia mechatronicznego	156
Rys. 7.34. Charakterystyki F_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κF_w dla próby 2...157	157
Rys. 7.35. Charakterystyki M_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κF_w dla próby 2...158	158
Rys. 7.36. Charakterystyki F_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κF_w dla próby 5...158	158
Rys. 7.37. Charakterystyki M_w oraz współczynnika redukcji obciążenia κF_w dla próby 5...159	159
Rys. 7.38. Średnie współczynniki redukcji obciążenia na podstawie sił wypadkowych dla ustawień kątów $\alpha = 1,14^\circ$ oraz $\beta = 0,82^\circ$	160
Rys. 7.39. Średnie współczynniki redukcji obciążenia na podstawie momentów wypadkowych dla ustawień kątów $\alpha = 1,14^\circ$ oraz $\beta = 0,82^\circ$	160
Rys. 7.40. Średnie współczynniki redukcji obciążenia κF_w dla wszystkich analizowanych prób w kolejności chronologicznej ich wykonywania wg numeracji od 1.2 do 3.11	161
Rys. 7.41. Średnie współczynniki redukcji obciążenia κM_w dla wszystkich analizowanych prób w kolejności chronologicznej ich wykonywania wg numeracji od 1.2 do 3.11.....	162

<i>Rys. 9.1. Wielkość rynku urzędzeń uprawowych w Unii Europejskiej w miliardach euro w latach 2012-2016 [162].....</i>	<i>166</i>
<i>Rys. 9.2. Wielkość rynku urzędzeń uprawowych w Unii Europejskiej w miliardach euro w latach 2014 – 2018 [163].....</i>	<i>167</i>
<i>Rys. 9.3. Indeks klimatu biznesowego CEMA (CBI) - łącznie [164]</i>	<i>168</i>
<i>Rys. 9.4. Bieżąca ocena działalności przedsiębiorstwa z podziałem na miesiące [164].....</i>	<i>168</i>
<i>Rys. 9.5. Ocena przewidywanego całkowitego obrotu przedsiębiorstw w ciągu najbliższych 6 miesięcy [164].....</i>	<i>168</i>
<i>Rys. 9.6. Klimat biznesowy - ilustracja cyklu biznesowego [164].....</i>	<i>169</i>
<i>Rys. 9.7. Strategie według analizy SWOT [167].....</i>	<i>176</i>
<i>Rys. 9.8. Mechatroniczna sekcja pieląca z narzędziem o zmiennej geometrii elementów skrawających glebę.....</i>	<i>180</i>

13.SPIS TABEL

<i>Tabela 1. Podział gleb z uwagi na opory stawiane narzędziom [35]</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 2. Podział gleb ze względu na opory stawiane narzędziom wg Polskiego Towarzystwa Gleboznawstwa, opracowano na podstawie: [35].....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 3. Przykładowe wartości kątów tarcia wewnętrznego ϕ i spójności gleb c [38]</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4. Kąty tarcia zewnętrznego ϕ gleb [38].....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 5. Czynniki fizyczne i agrotechniczne wpływające na erozję wodną gleb</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 6. Podstawowe mechanizmy działania herbicydów [74–78].....</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 7. Efektywność zastosowania mechatronicznego systemu wspomagania pracy pielników międzyrzędowych w aspekcie parametrów: v -średnia prędkość zabiegu; s - odchylenie standardowe cv - współczynnik zmienności.</i>	<i>50</i>
<i>Tabela 8. Parametry geometryczne gęsiostopek [35,38].....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 9. Kluczowe parametry wpływające na proces pielenia mechanicznego</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 10. Właściwości fizyczne stali M303HH [157]</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 11. Skład chemiczny stali M303HH [157].....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 12. Zestawienie przypadków badanych obciążeń konstrukcji czujnika w analizach wytrzymałościowych metodą elementów skończonych</i>	<i>98</i>
<i>Tabela 13. Odpowiedzi mostków pierwszego czujnika na obciążenia zewnętrzne.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 14. Analiza konkurencyjności instytutu Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznańskiego Instytutu Technologicznego pod kątem realizacji wdrożenia przedmiotu doktoratu [165] ...</i>	<i>170</i>
<i>Tabela 15. Analiza SWOT projektowanego urządzenia w ramach doktoratu wdrożeniowego, opracowanie własne w oparciu o [167]</i>	<i>174</i>
<i>Tabela 16. Klasyfikacja elementów składowych czynników analizy SWOT</i>	<i>175</i>