

## SIMULATION RESEARCH OF SPREADING PROCESS OF MINERAL FERTILIZER BY A DISC SPREADER

### Summary

The realization of the rules of the precision agriculture is recently one of the main areas of the agriculture technology development. The precision agriculture system relies on the optimal dosing of the mineral constituents and plant preservation means as an answer to the changeable demands for them in various areas of the field. As for realization of the postulates of this system is concerned, more and more precise machinery is needed. Recently the most common machines used for distribution of mineral fertilizers are the centrifugal spreaders. The main criterion for their work quality is the transverse distribution pattern on the spreading width. Its profile depends on many factors. The laboratory measurements of their influence on the fertilizer distribution are being carried out in spreading halls that are specially built for this purpose, which makes them very expensive. It is the reason why for several years now an alternative method of researching the work of the spreaders is being developed. This method is based on computer simulation. An analysis of the literature from the area of the mathematical modeling of the fertilizer distribution process based on the movement of this particles on the spreader disc and in the air has been presented in the first part of this research. In the further part is presented own simulation program and compared with similar presented in the literature. The last part consist of own simulation measurements, which goal was to specify the influence some factors have on the transverse distribution pattern.

## SYMULACYJNE BADANIA PROCESU WYSIEWU NAWOZU ROZSIEWACZEM TARCZOWYM

### Streszczenie

Realizacja zasad rolnictwa precyzyjnego jest obecnie jednym z głównych kierunków rozwoju techniki rolniczej. System precyzyjnego rolnictwa polega na optymalnym dawkowaniu składników mineralnych i środków ochrony roślin, jako odpowiedź na zmienne na nie zapotrzebowania w różnych miejscach pola. Do realizacji postulatów tego systemu potrzeba zatem coraz to bardziej precyzyjnych urządzeń. Najczęściej używanymi obecnie maszynami, przeznaczonymi do rozprowadzania nawozów mineralnych, są rozsiewacze tarczowe. Podstawowym kryterium jakości ich pracy jest rozkład poprzeczny nawozu na pasie siewnym. Jego profil zależy od wielu czynników. Badania laboratoryjne ich wpływu na rozkład nawozu przeprowadza się w specjalnie dla tego celu wybudowanych halach co sprawia, że są one bardzo kosztowne. Z tego też powodu od kilku lat rozwija się alternatywna metoda badania pracy rozsiewaczy, oparta na symulacji komputerowej. W pierwszej części niniejszej pracy przedstawiono analizę literatury w zakresie matematycznego modelowania procesu rozsiewania nawozów, opartej na równaniach ruchu jego cząstek na tarczy rozsiewacza oraz w powietrzu. W dalszej części zaprezentowano własny program symulacyjny oraz dokonano jego porównania z podobnymi, przedstawionymi w literaturze. Ostatnią część pracy stanowią własne badania symulacyjne, których celem było określenie wpływu niektórych parametrów wpływających na profil rozkładu poprzecznego.

### 1. Wprowadzenie

Jednym z głównych kierunków rozwoju techniki rolniczej jest realizacja postulatów rolnictwa precyzyjnego. Według J. Kulisza [1] terminem tym określa się system bardziej precyzyjnego stosowania środków ochrony roślin i nawozów mineralnych oraz dokumentowania wyników produkcji.

Podstawą rolnictwa precyzyjnego są dokładne wyniki pomiarów właściwości fizykochemicznych gleby, zachwaszczenia upraw, rozwoju chorób lub szkodników w poszczególnych punktach obszaru pola. Pierwszym etapem wdrożenia tego systemu jest sporządzenie tzw. map pól, które przedstawiają zróżnicowanie gleby w zasobność składników mineralnych na całym obszarze uprawnym. Informacja ta pozwala na dostarczenie optymalnej ilości nawozu, uzależnionej wyłącznie od zapotrzebowania w danym miejscu powierzchni pola. Dane potrzebne do utworzenia map pól uzyskuje się prowadząc bezpośrednie badania zawartości gleby w składniki mineralne lub poprzez badanie plonu w okresie jego zbioru (tzw. mapa plonów).

Za pomocą ogólnie dostępnego obecnie systemu GPS możliwe jest nadanie każdemu miejscu na polu odpowiedniej długości i szerokości geograficznej. Podczas nawożenia, dzięki wykorzystaniu GPS, komputer pokładowy ciągnika określa swoją pozycję oraz odczytuje z mapy dawki nawozu odpowiadające swemu aktualnemu położeniu na polu i wysyła sygnały o wymaganej aktualnie dawce do urządzenia sterującego ilością wysiewu.

Spośród wielu korzyści rolnictwa precyzyjnego za najważniejsze uważa się:

- zwiększenie plonów oraz obniżenie kosztów produkcji. Stosowanie zarówno zbyt dużych jak i zbyt małych dawek nawozu w pewnych miejscach powoduje jakościowe i ilościowe straty w plonach i może także prowadzić to strat w kosztach sięgających do 10% i więcej [3].
- zwiększenie ochrony środowiska. Nadmierna ilość nawozu może także być powodem zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych (Parris i Reille 1999).

Najczęściej używanymi maszynami przeznaczonymi do rozprowadzania nawozów w Europie są rozsiewacze tar-

czowe [2]. Powody tak dużej popularności tych maszyn wśród rolników przedstawiają się następująco:

- duża szerokość robocza (ponad 36 m, czyli ok. 15 razy szerokość maszyny);
- względnie niewielki rozmiar maszyny (ok. 2 m);
- prosta i trwała konstrukcja;
- stosunkowo niskie koszty produkcji (niska cena zakupu maszyny).

W celu szacowania podstawowych parametrów pracy rozsiewacza tarczowego wyznacza się przestrzenny rozkład wysiewanego nawozu, który przedstawia ilość jego masy przypadającą na jednostkę powierzchni na pasie siewnym. Istnieje wiele rodzajów przestrzennych rozkładów nawozu (rys. 1.), jednak najpopularniejszym obecnie jest rozkład poprzeczny (TRD), który często służy do porównywania osiągnięć pracy różnych modeli rozsiewaczy. Aby uzyskać rozkład poprzeczny przeprowadza się pomiary halowe w specjalnie dla tego celu stworzonych pomieszczeniach o dużej powierzchni, często klimatyzowanych by wyeliminować wpływ niekontrolowanych czynników zewnętrznych (wilgotność, współczynniki tarcia), determinujących jego kształt. Ze względu na duże koszty takich hal pomiarowych są one mało dostępne i niewielu producentów rozsiewaczy może z nich korzystać. Dlatego też od kilkadziesiątu już lat prowadzi się badania nad alternatywną metodą symulacyjną wyznaczania rozkładu nawozu, bazującą na matematycznym modelu zachowania się wysiewanych cząstek nawozu. Model taki jest podstawą programów komputerowych, przy pomocy których można dokonać symulacji pracy rozsiewaczy i tym samym określać rozkłady wysiewanego przez nie nawozu.

Przeprowadzone badania symulacyjne wykazują, że przy założeniu dokładnego dozowania nawozu na tarczy i dokładnego prowadzenia maszyny po polu (GPS), najistotniejszym czynnikiem determinującym dokładność rozmieszczenia nawozu na powierzchni pola jest profil rozkładu poprzecznego nawozu na pasie siewnym. Za optymalny należy uznać rozkład trójkątny lub kosinusoidalny, które przy stosowaniu optymalnego przekrycia pasów siewnych

dają w wyniku rozkład ściśle równomierny. Na końcowy kształt rozkładu poprzecznego wpływa duża liczba czynników (rys. 2.). Istniejące między nimi interakcje systematyczne powodują, że zbadanie ich na drodze eksperymentu fizycznego byłoby niezmiernie pracochłonne i kosztowne. O wiele łatwiej i taniej natomiast jest przeprowadzić takie badania przy użyciu symulacji komputerowej.

## 2. Przegląd dotychczasowego stanu badań

Jak już wspomniano powyżej, podstawą utworzenia symulacji, mającą na celu uzyskanie rozkładu masy nawozu jest analiza trajektorii ruchu cząstek nawozu w trakcie pracy rozsiewacza tarczowego. Taka symulacja obejmuje trzy zasadnicze problemy [2]:

- wysyp cząstek nawozu ze zbiornika i jego lądowanie na obracającej się tarczy;
- zachowanie się strumienia cząstek nawozu na obracającej się tarczy;
- zachowanie się cząstek nawozu poza tarczą (w powietrzu) – określenie linii balistycznej cząstek na drodze „krawędź tarczy – ziemia”.

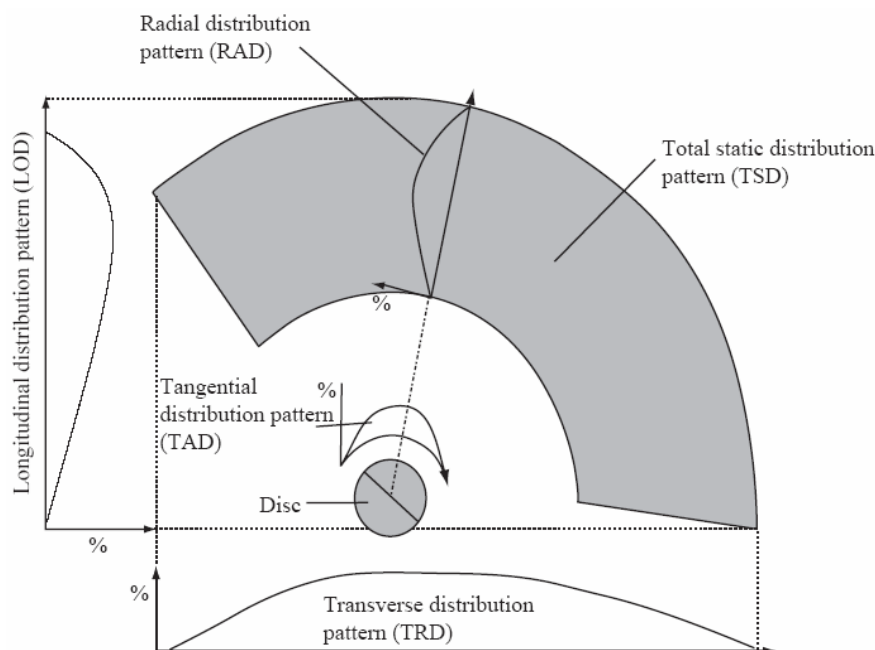
Badania nad utworzeniem matematycznego modelu ruchu cząstek na tarczy i w powietrzu, który jak najbardziej oddawałby ich zachowanie w warunkach rzeczywistych, trwają już od kilkadziesiąt lat. Na podstawie analizy dostępnej literatury można przedstawić następujące równania ruchu cząstek poruszających się na tarczy rozsiewacza [4]:

- płaskiej z łopatkami usytuowanymi w sposób promieniowy -

$$\frac{d^2r}{dt^2} - \omega^2 r + 2\mu_v \omega \frac{dr}{dt} + \mu_d g = 0,$$

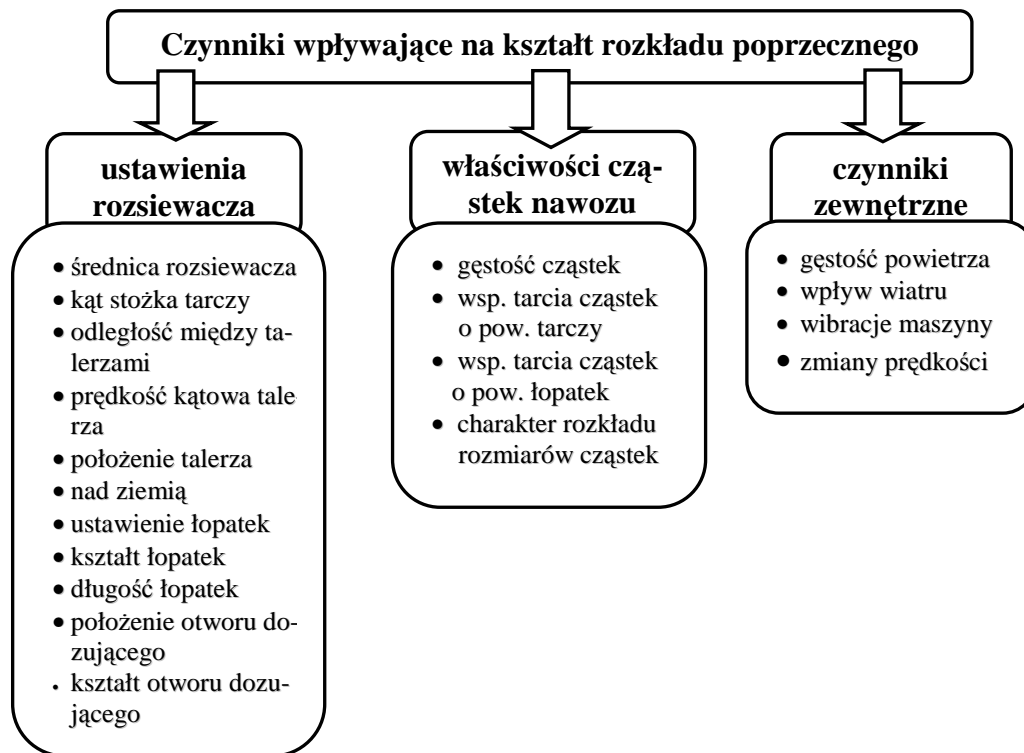
gdzie:

- r – promieniowa pozycja cząstki na tarczy
- $\omega$  – prędkość kątowna tarczy
- $\mu_d, \mu_v$  – współczynniki tarcia cząstki o tarczę i łopatki
- g – przyspieszenia ziemskie



Rys. 1. Rodzaje rozkładów nawozu [3]

Fig. 1. Types of fertilizer distribution patterns



Rys. 2. Czynniki mające wpływ na szerokość i kształt rozkładu poprzecznego nawozu  
 Fig. 2. Factors determining span and shape of transverse distribution of fertilizer

- stożkowej z łopatkami zamocowanymi nie promieniowo:

$$C_a \frac{d^2 r}{dt^2} + C_b \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + C_c \frac{dr}{dt} + C_d r + C_e = 0,$$

gdzie:

$r$  – promieniowa pozycja cząstki na tarczy  
 $C_a, C_b, C_c, C_d, C_e$  – współczynniki równania uwzględniające geometrię tarczy i sposób rozmieszczenia łopatek, prędkość kątową oraz współczynniki tarcia cząstek o tarczę i łopatkę.

Powyższe równania uwzględniają działanie na cząstkę siły odśrodkowej oraz sił wynikających z bezwładności cząstki jak również oporu jej tarcia o powierzchnię tarczy oraz łopatek.

Aby określić trajektorię ruchu cząstek nawozu w powietrzu, należy w pierw wyznaczyć ich prędkość na krawędzi tarczy rozsiewacza (tzw. prędkość wylotu) oraz kierunek, w którym cząstki te opuszczają powierzchnię tarczy, określony tzw. kątem zejścia cząstki. Mające te dane, dalszy ruch cząstki rozpatruje się w dwuwymiarowym układzie współrzędnych, korzystając z równań opisujących jej ruch od momentu opuszczenia krawędzi tarczy do chwili lądowania na ziemi. Do tego celu można wykorzystać następujące równania [5]:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -K \frac{dx}{dt} \sqrt{\left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2}$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -g - K \frac{dy}{dt} \sqrt{\left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2}$$

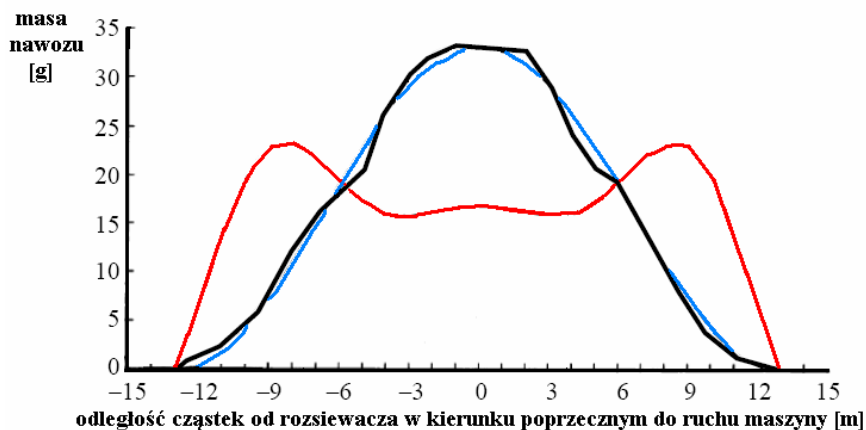
gdzie:

- $x$  – pozioma pozycja cząstki w kierunku zgodnym z poziomą składową wektora prędkości wylotowej
- $y$  – pionowa pozycja cząstki (wysokość nad ziemią)
- $K$  – współczynnik oporu uwzględniający właściwości cząstek i powietrza
- $g$  – przyspieszenie ziemskie.

Przedstawione powyżej równania opisują ruch swobodnej cząstki (granuli nawozu) na tarczy rozsiewacza i w powietrzu. W celu określenia zachowania się całego strumienia cząstek, z którym mamy do czynienia w rzeczywistości, sumuje się tory ruchu poszczególnych cząstek metodą superpozycji. W ten sposób pomija się wzajemne oddziaływanie ruchomych cząstek nawozu na tarczy i w powietrzu, nie uwzględniając tym samym wpływu tego zjawiska na końcowy rozkład nawozu. Z tego powodu porównanie wyników badań symulacyjnych z doświadczalnymi wykazuje dość duże zróżnicowanie w kształcie rozkładu.

Badania takie przeprowadzili między innymi R. Olie-slagers, H. Ramon oraz J. De Baerdemaeker [5], którzy bazując na powyższych zależnościach utworzyli model obliczający rozkład rozrzuconego nawozu. Wyniki swej symulacji porównali z danymi uzyskanymi na bazie eksperymentu, których dostarczyli im producenci rozsiewaczy. Porównanie ich wyników poniżej.

Jak widać na rys. 3, wyniki symulacyjne (krzywa czerwona) dość znacznie różnią się od wyników pomiarów eksperymentalnych (krzywa czarna). Różnica ta może być spowodowana faktem nieuwzględnienia w modelu, wspomnianych już powyżej interakcji międzycząsteczkowych. W obliczeniach przyjęto, że początkowa pozycja cząstek lądujących na tarczy jest określona bezpośrednio przez usytuowanie i wymiary otworu dozującego, co jest niezgodne z rzeczywistością. W celu uwzględnienia w oblicze-



Rys. 3. Wykresy rozkładu poprzecznego uzyskane na drodze symulacji (krzywa czerwona), pomiarów empirycznych (krzywa czarna) oraz danych skorygowanych (krzywa niebieska) [5]

Fig. 3. Diagrams of transverse distribution obtained from simulation (red line), laboratory measurements (black line) and simulation procedure with orifice dimensions correction (blue line) [5]

niach symulacyjnych oddziaływań międzycząsteczkowych, rozwiązano zagadnienie odwrotne, wyznaczając miejsce ich lądowania na tarczy, posługując się danymi pochodzącymi z pomiarów eksperymentalnych. Skutkiem tego była zmiana położenia i wymiarów otworu dozującego w stosunku z ustawieniami podczas badań empirycznych. Spowodowało to inne, w stosunku do obliczonych uprzednio, prędkości i kierunki ruchu cząstek na krawędzi tarczy, w wyniku czego zmienił się też otrzymany rozkład nawozu (linia niebieska), stając się bardzo zbliżonym do rzeczywistego, określonego na drodze eksperymentu.

### 3. Badania własne

#### 3.1. Cel badań

Celem prowadzonych badań jest określenie wpływu parametrów determinujących profil rozkładu poprzecznego na pasie siewnym, takich jak prędkość obrotowa tarczy, wysokość jej położenia nad ziemią, czy właściwości nawozu, przy wykorzystaniu symulacji komputerowej.

#### 3.2. Metoda i środki

W celu przeprowadzenia badań ułożono własny program symulacyjny, wykorzystujący te same modele ruchu cząstki na tarczy i w powietrzu co dostępne w literaturze. Dodatkowo użyte w programie równania uwzględniają jednostronne działanie więzów pomiędzy cząstką a łopatką, biorąc w ten sposób pod uwagę zjawisko odbijania się cząstek nawozu o łopatkę.

W fazie ruchu na tarczy cząstka nawozu jest poddana głównie sile oddziaływania łopatki, którą można rozłożyć na składową normalną  $N$  i styczną  $T$ . Siły te są ze sobą związane prawem tarcia:

$$T = \mu N$$

Siła normalna z kolei jest uzależniona od odkształcenia granuli  $u$  zgodnie z nieliniową zależnością:

$$N = k_1 u^z, \text{ gdy } \frac{du}{dt} > 0,$$

$$N = k_2 u^z, \text{ gdy } \frac{du}{dt} < 0.$$

Założono przy tym, że współczynnik  $k$  ma inną wartość przy narastaniu odkształcenia  $u$ , a inną przy jego zmniejszaniu. Stosunek tych wielkości jest określony jako współczynnik restytucji siły zderzenia charakteryzujący dyssypację energii przy zderzeniu.

Takie podejście, które różni się od tych dotychczas spotykanych w literaturze, pozwala na dokładniejsze odwzorowanie w modelu matematycznym istoty zjawisk zachodzących na łopatkę rozsiwacza oraz określenie wartości sił dynamicznych działających na cząstkę.

Struktura programu składa się z trzech następujących procedur:

- symulacja ruchu granul na tarczy;
- symulacja ruchu granul w powietrzu, z uwzględnieniem różnych prędkości wiatru bocznego;
- symulacja całego procesu rozsiewania;

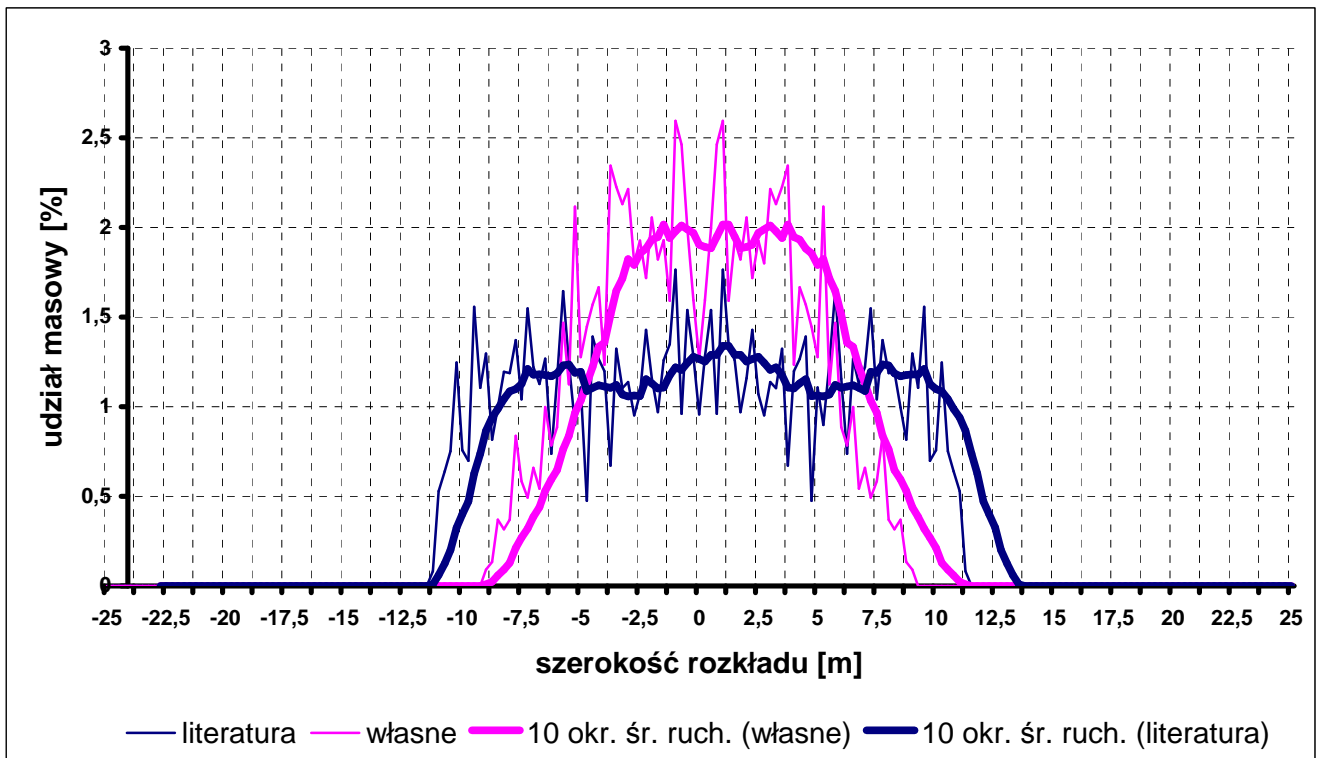
W wyniku symulacji ruchu granul na tarczy obliczane są trajektorie cząstek nawozu startujących z różnych punktów tarczy, w obrębie otworu dozującego. Po opuszczeniu przez granule tarczy, zostaje ukazany wektor prędkości ich zejścia.

W ramach symulacji ruchu granul w powietrzu zostaje kilkakrotnie uruchomiona procedura całkowania równania ruchu cząstek w powietrzu dla zadanych warunków początkowych (prędkość wylotowa cząstek, kąt stożka tarczy) oraz dla kilku prędkości wiatru, zmienianych od zera do podanej w danych wartości maksymalnej.

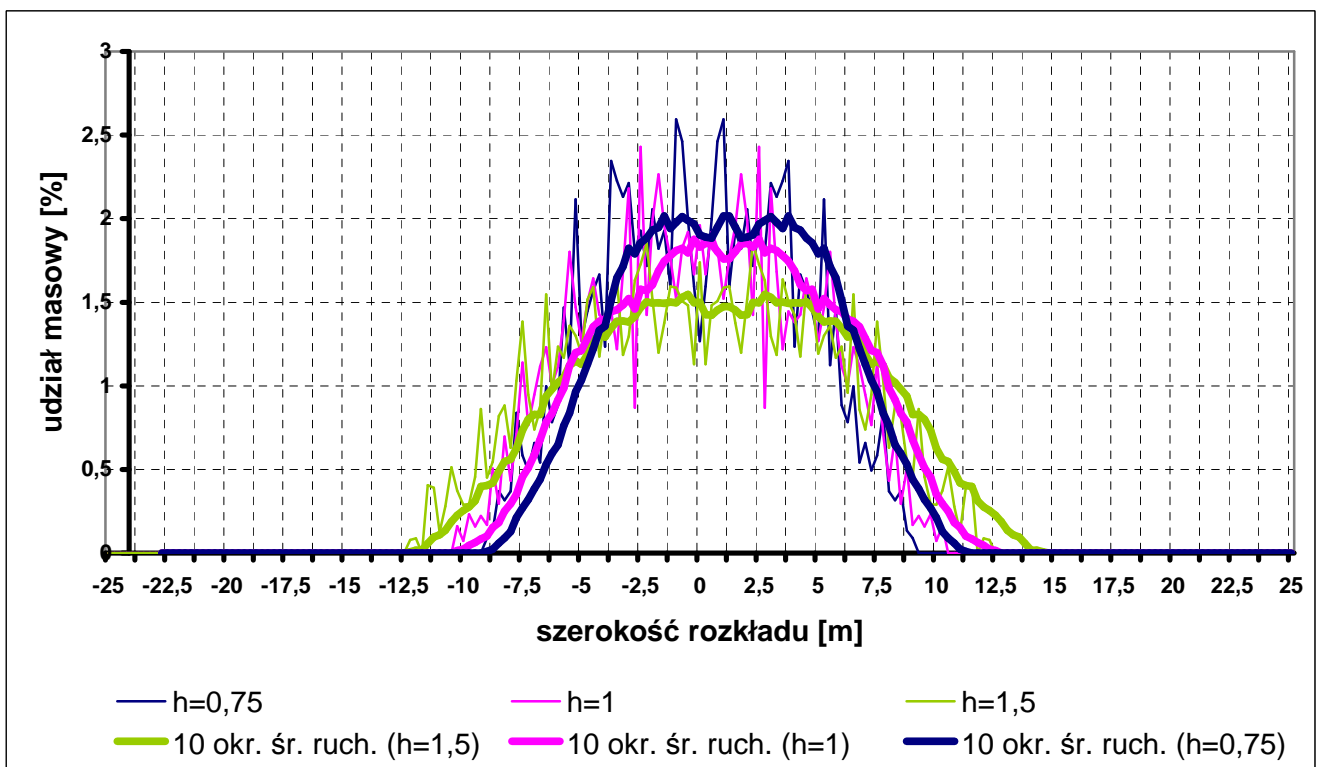
Wielokrotne wykonanie symulacji całego procesu rozsiewania pozwala obliczyć położenie punktów lądowania granul o losowo zmiennych, w pewnym przedziale średnicach i punktach startowych. Na tej podstawie zostaje obliczony rozkład poprzeczny nawozu na pasie siewnym przy dowolnie założonym kierunku ruchu rozsiwacza. Rozkład ten jest rzutem rozkładu powierzchniowego statycznego na oś prostopadłą do wybranego kierunku ruchu rozsiwacza. Dla zespołu dwutarczowego wynikowy rozkład można uzyskać poprzez dodanie do danego rozkładu jego własnego lustrzanego odbicia względem płaszczyzny symetrii maszyny.

#### 3.3. Wyniki

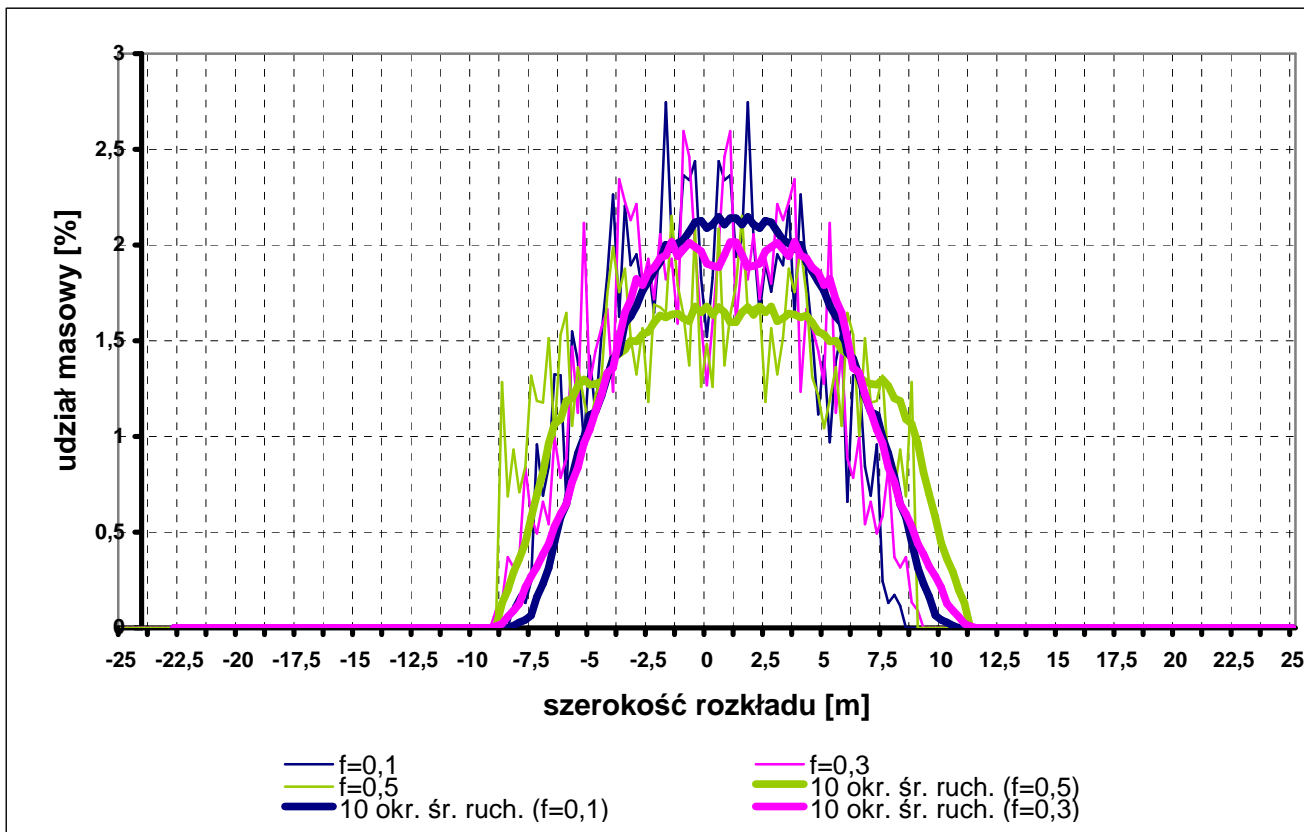
Wszystkie próby przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wykonano dla 1000 pojedynczych cząstek nawozu.



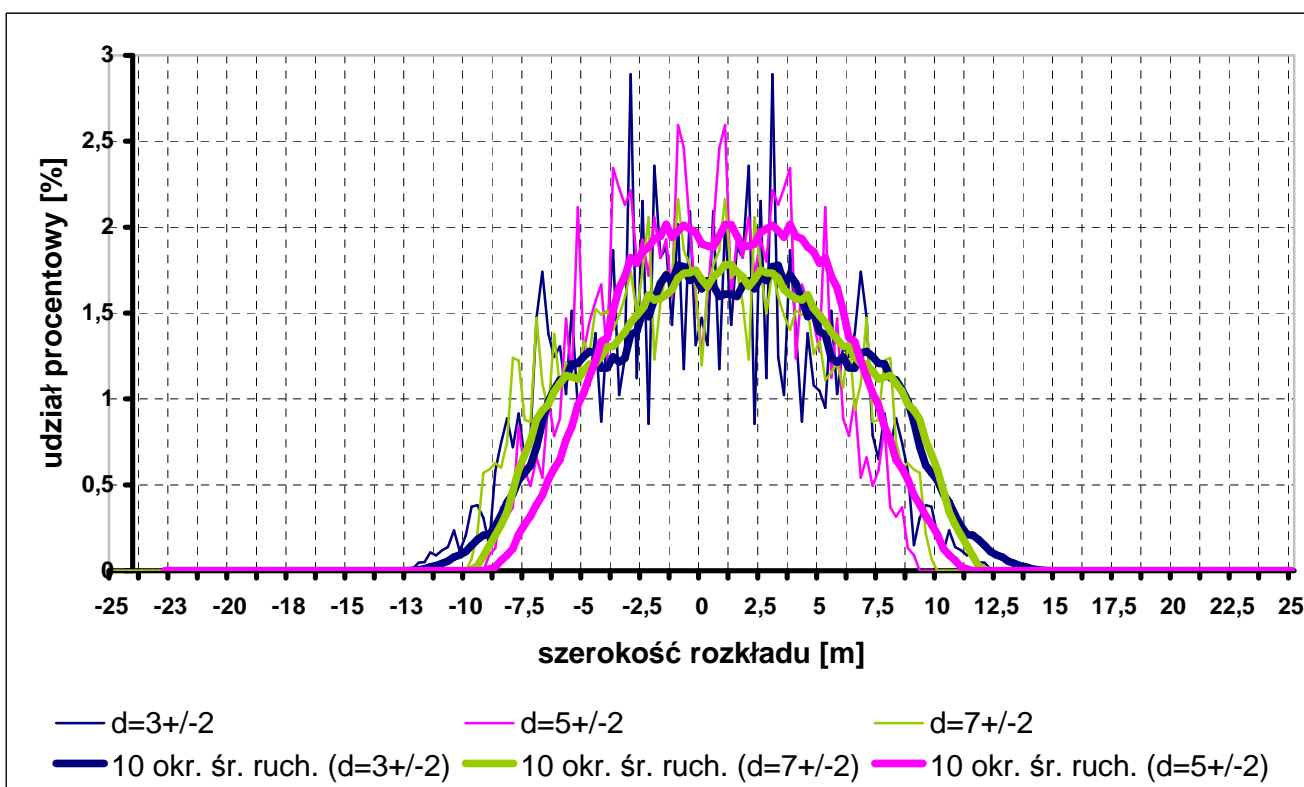
Rys.4. Porównanie wyników badań z wykorzystaniem literaturowego modelu ruchu cząstek oraz modelu własnego  
 Fig. 4. Comparison of experiment results obtained with the use of the two different models: one obtained from literature[5], and second the own constructed model



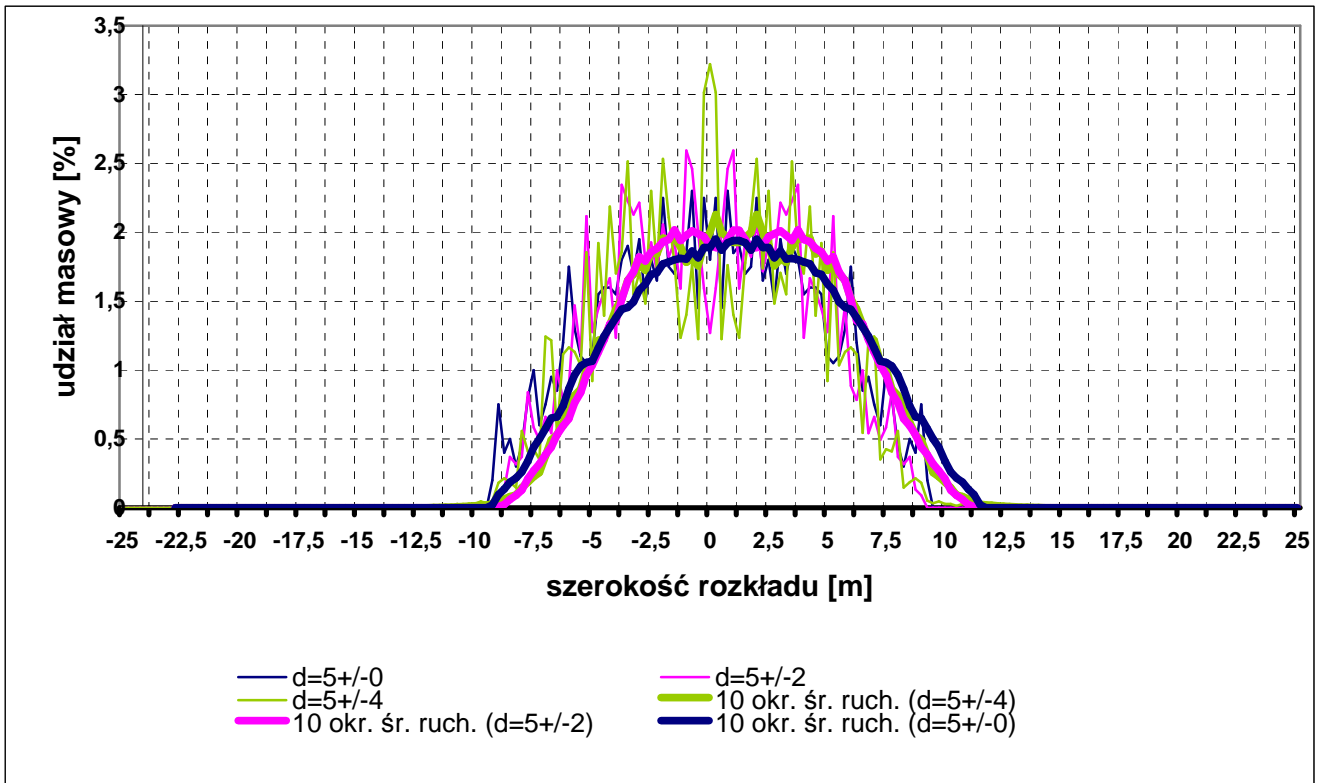
Rys. 5. Wpływ wysokości umieszczenia tarczy nad ziemią na kształt rozkładu poprzecznego  
 Fig. 5. Impact of the disc level over the ground on the transversal distribution



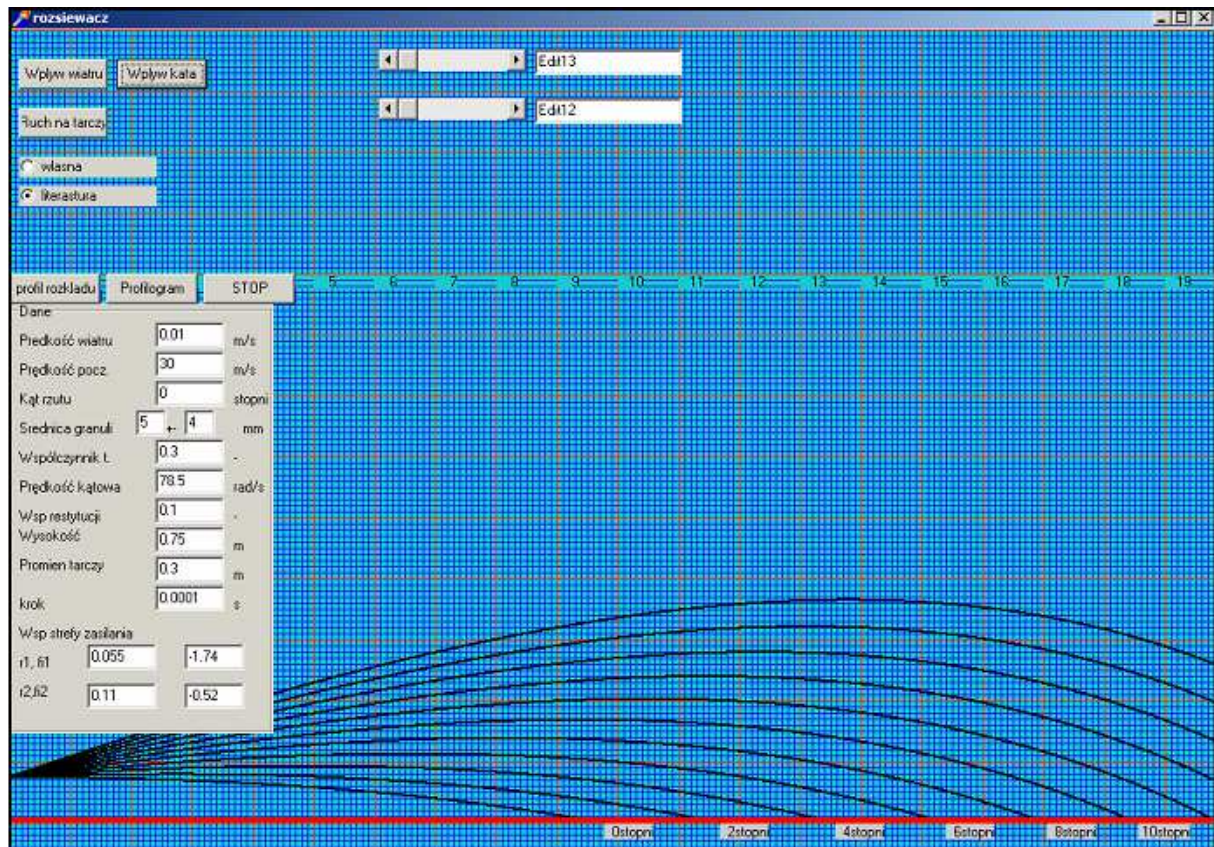
Rys.6. Wpływ współczynnika tarcia cząstek o powierzchnię tarczy i łopatki na kształt rozkładu poprzecznego  
 Fig. 6. Impact of the friction coefficient between particles and a disc surface, on the transversal distribution



Rys. 7. Wpływ średniej średnicy cząstek nawozu na kształt rozkładu poprzecznego  
 Fig. 7. Impact of medium particle diameter on the transversal distribution



Rys. 8. Wpływ wielkości odchylenia standardowego od średniej średnicy granula na kształt rozkładu poprzecznego  
 Fig. 8. Impact of standard deviation of particle diameter on the transversal distribution



Rys. 9. Wpływ pionowego kąta wyrzutu granul na odległość ich lotu  
 Fig. 9. Impact of the particles trajectory starting angle on their flight distance

W tym celu wykorzystano model symulacyjny rozsiewacza z tarczą o promieniu 0,3m i obrotach 750 obr/min (78,5 rad/s). Wpływ każdego z badanych parametrów na kształt rozkładu poprzecznego wyznaczono zmieniając trzykrotnie jego wartość.

Wyniki przeprowadzonych badań ujęto w wykresy i przedstawiono poniżej.

### 3.4. Analiza wyników

Symulacja ruchu granul na tarczy i w powietrzu oparta o proste modele matematyczne zamieszczone w literaturze, daje wyniki zgodne z doświadczalnymi co do predykcji szerokości pasa siewnego. Jednocześnie jednak wyniki symulacji odbiegają od danych empirycznych w zakresie kształtu rozkładu poprzecznego nawozu na pasie siewnym. W celu zapewnienia tej zgodności literatura proponuje korektę położenia i kształtu otworu dozującego o wartości wynikające z rozwiązania zagadnienia odwrotnego. Badania wykazują więc, że postać rozkładu i szerokość pasa siewnego są zdeterminowane tymi właśnie czynnikami. Brakuje jednak wyjaśnienia przyczyny tej niezgodności i teorii, na podstawie której to przesunięcie otworu dozującego można by przewidywać. Własne badania prowadzone z wykorzystaniem modelu ruchu granul podanego w literaturze, wykazały pewną rozbieżność wyników symulacji z danymi literaturowymi [5]. Opracowana w ramach niniejszej pracy procedura bazująca na równaniach równowagi dynamicznej granuli w trakcie zderzenia z łopatką tarczy rozsiewającej, dała wyniki bardziej zgodne z danymi empirycznymi co do kształtu rozkładu poprzecznego, jednakże zwężeniu uległa jego szerokość.

Zgodnie z oczekiwaniami wraz z coraz wyższym położeniem tarczy rozsiewacza nad ziemią wzrasta odległość, na którą zostają wyrzucone cząstki nawozu. W związku z tym zwiększa się też szerokość rozkładu poprzecznego.

Badania wpływu współczynnika tarcia nawozu o powierzchnię tarczy i łopatek wykazały, że jego wartość nie zmienia znacząco szerokości rozkładu poprzecznego. Ukazują one jednak, że zmiana współczynnika tarcia powoduje zmianę kształtu rozkładu na pasie siewnym.

W badanym zakresie średnic granul zaobserwowano stosunkowo niewielką zmianę szerokości pasa siewnego. Zgodnie z oczekiwaniem, zwiększenie średnicy granul powinno pociągać za sobą zwiększenie szerokości pasa siewnego, jednak efekt ten nie był jednoznaczny przy zastosowaniu własnej procedury symulacyjnej. Przyczyna tego zjawiska nie jest jednoznaczna i wymaga to dalszych badań.

Badania symulacyjne ujawniły bardzo silny wpływ kąta wyrzutu granuli względem płaszczyzny poziomej na zasięg rzutu, a tym samym szerokość pasa siewnego. Zmiana tego kąta o jeden stopień powoduje zmianę długości rzutu o około jeden metr. Zmiany tego kąta mogą być powodowane poprzecznym przechyleniem się agregatu na polu,

wynikającym z jego wibracji podczas ruchu na nierównym podłożu.

### 3.5. Wnioski

Analiza przeprowadzonych w ramach niniejszej pracy badań prowadzi do następujących wniosków:

1. Dotychczasowe teorie ruchu nawozu na tarczy rozsiewacza oraz w powietrzu tylko częściowo wyjaśniają zjawiska zachodzące w trakcie wysiewu nawozu. Dla celów praktycznych wymagana jest więc korekcja danych wejściowych, ustalanych na bazie badań empirycznych.
2. Ze względu na duży wpływ przechyłu poprzecznego maszyny na zasięg rzutu należy poświęcić więcej uwagi problemowi eliminacji tego czynnika w konstrukcji precyzyjnych rozsiewaczy.
3. Konieczne są dalsze badania empiryczne i teoretyczne, których celem powinno być takie udoskonalenie modelu matematycznego wysiewu nawozu, by symulacja komputerowa była wartościową alternatywą kosztownych badań laboratoryjnych w procesie opracowywania tabel regulacyjnych rozsiewaczy i doskonalenia ich konstrukcji.
4. Istnieje hipoteza, że przyczyną rozbieżności w wynikach empirycznych oraz symulacji komputerowej jest pominięcie wzajemnych oddziaływań granul na tarczy rozsiewacza, oraz zmian przekroju strumienia granul zasypywanych na tarczę z otworu dozującego w trakcie spadania na tarczę. Rozstrzygnięcia w tej sprawie można uzyskać dopiero ona bazie szczegółowych badań empirycznych.

### Literatura

- [1] Kulisz J.: Więcej precyzji w rolnictwie. 2003, [www.raportrolny.pl](http://www.raportrolny.pl)
- [2] Reumers J., Tijskens E., Ramon H.: Experimental Characterisation of the Cylindrical Distribution Pattern of Centrifugal Fertiliser Spreaders: towards an Alternative for Spreading Hall Measurements. *Biosystems Engineering* 86 (4), 431–439, 2003
- [3] Dintwa E. i inni: Calibration of a Spinning Disc Spreader Simulation Model for Accurate Site-specific Fertiliser Application. *Biosystems Engineering* 88 (1), 49–62, 2004
- [4] Dintwa E. i inni: Model for Simulation of Particle Flow on a on a Centrifugal Fertiliser Spreader. *Biosystem Engineering* 87 (4), 407–415, 2004
- [5] Olieslagers R., Ramon H., De Beardeamaker J.: Calculation of Fertilizer Distribution Patterns from a Spinning Disc Spreader by means of a Simulation Model. *Journal of agricultural Engineering Research* 63, 137–152, 1996.