

# IDENTYFIKACJA CECH KORZENI MARCHWI JADALNEJ Z WYKORZYSTANIEM KOMPUTEROWEJ ANALIZY OBRAZU I METOD SZTUCZNEJ INTELIGENCJI

Monika Janaszek

*Katedra Podstaw Inżynierii, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*

## 1 WPROWADZENIE

Wygląd produktów czy surowców jest uznawany za jeden z najważniejszych wyznaczników ich akceptowalności, ponieważ ocena wzrokowa jest z reguły pierwszym wrażeniem, jakie dociera do odbiorcy. Determinantami wyglądu mogą być wielkość i kształt, barwa, jej odcienie, nasycenie i równomierność oraz struktura i topografia powierzchni [11], przy czym spośród wszystkich tych cech barwa w największym stopniu wpływa na postrzeganie jakości i może służyć do bezpośredniego lub pośredniego jej szacowania [1, 25].

Pomiaru barwy można dokonać różnymi metodami. W metodach sensorycznych do jej oceny wykorzystuje się zmysł wzroku człowieka. Osobną grupę stanowią instrumentalne metody pomiaru barwy, w których jako narzędzia stosuje się kolorymetry, spektrofotometry czy densytometry. Alternatywę dla tych metod stanowią dość popularne w ostatnich latach techniki pozyskiwania informacji z obrazów badanych obiektów. Do wzrostu popularności tych metod przyczynił się między innymi prężny rozwój elektroniki, a wraz z nim nowoczesne metody zapisu informacji, możliwości obliczeniowe komputerów i możliwości tworzenia zaawansowanych aplikacji, umożliwiających zapisanie obrazów w postaci cyfrowej oraz ich przetwarzanie [20].

Komputerowa analiza obrazu jest w ostatnich latach coraz częściej wykorzystywana również w ocenie warzyw i owoców [5]. Informacje uzyskiwane dzięki jej zastosowaniu, umożliwiają nie tylko ocenę barwy, ale również precyzyjny i obiektywny opis rozmiaru, kształtu oraz

tekstury za pomocą cech ilościowych (skokowych i ciągłych). Ze względu na większą dokładność pomiaru i porównywalność ocenianych parametrów oraz skrócenie czasu trwania analiz, komputerowa analiza obrazu stanowi alternatywę dla stosowanych dotąd konwencjonalnych metod oceny produktów biologicznych, co podkreślają Lewicki [11] oraz Du i Sun [7].

Marchew jest jednym z najważniejszych warzyw uprawianych w Polsce i po kapuście zajmuje drugie miejsce pod względem wysokości plonu. Korzenie dają się łatwo przechowywać i są cennym surowcem do przerobu na konserwy, mrożonki, susze, koncentraty oraz soki. Wysoka wartość odżywcza i walory dietetyczne marchwi oraz łatwy dostęp do niej o każdej porze roku są od lat powodem dużego zainteresowania producentów warzyw i ich przetworów, pragnących wprowadzać na rynek coraz lepsze produkty, akceptowalne przez konsumentów. Ich wytworzenie zależy nie tylko od prawidłowo przeprowadzonego procesu technologicznego, ale również od wykorzystania odpowiedniej jakości surowca. W przetwórstwie owocowo-warzywnym barwa, tekstura oraz kształt są, obok wartości odżywczej, niezwykle istotnymi cechami zarówno z punktu widzenia konsumentów, jak i producentów przetworów, dlatego są uwzględniane nie tylko przy ocenie jakości gotowego produktu, ale również surowca.

Podstawę określania przydatności przetworzonej marchwi stanowi klasyfikacja ze względu na ich skład chemiczny. Duży nacisk stawia się również na identyfikację odmianową marchwi, gdyż odmiana ma silny wpływ na jakość surowca i tym samym na jakość finalnego produktu [24]. Duże znaczenie w przypadku

oceny przydatności przetwórczej marchwi mają również barwa i tekstura. Barwa korzeni może ulegać zmianie w zależności od stosowanych w przemyśle przetwórczym technologii, tekstura natomiast wpływa na parametry procesów przetwórczych.

W literaturze można znaleźć szereg wskazań dotyczących jakości marchwi przeznaczonej do przetwórstwa. Nie są one jednak precyzyjne i nie mają formalnego charakteru. Klasyfikacja marchwi jest utrudniona ze względu na brak jednoznacznego i oficjalnego wskazania cech determinujących jej przydatność przetwórczą. Wnioskowanie o jakości marchwi jako surowca odbywa się zatem w warunkach niepełnej i niepewnej wiedzy.

O jakości marchwi można wnioskować na podstawie wyników analiz sensorycznych [17, 21, 23] lub badań jej tekstury, barwy, właściwości chemicznych i morfologicznych [3, 18, 6]. McLellan i wsp. [12] ustalili, że o akceptowalności marchwi świeżej przez konsumenta decyduje głównie zapach. Rosenfeld i wsp. [15] stwierdzili natomiast, że prócz zapachu ważnymi wyznacznikami jakości marchwi są: smak, soczystość, chrupkość oraz barwa.

Wnioski z badań, przeprowadzonych przez Baardsetha i wsp. [3] oraz Skrede i wsp. [18] pozwalają przypuszczać, że klasyfikacja marchwi może być z powodzeniem wspomagana komputerową analizą obrazu korzeni, a w szczególności analizą barwy. Autorzy wykazali bowiem, że różnice w zawartości cukrów oraz masie suchej substancji i karotenoidów mają wpływ na barwę korzeni. Ponadto Baardseth i wsp. [4] wykazali, że jakość produktu końcowego można określić na podstawie barwy i składu chemicznego surowca. Horgan i wsp. [8] udowodnili, że barwa i tekstura obrazu korzeni marchwi mogą stanowić podstawę do jej identyfikacji odmianowej.

Obiektywna, precyzyjna oraz jednoznaczna klasyfikacja korzeni marchwi ze względu na przydatność przetwórczą stanowi problem. Jego źródłem jest niejednorodność morfologiczna korzeni oraz to, że jakość marchwi jest w dużej mierze wynikiem interakcji genotypowo-środowiskowej. Należy zatem poszukiwać takiego rozwiązania, dzięki któremu możliwa będzie klasyfikacja korzeni, w oparciu o niezbyt rozległy zbiór cech, możliwych do uzyskania w krótkim czasie i w prosty sposób. W tym celu wykorzystano komputerową analizę obrazu

i metody sztucznej inteligencji, które powinny ułatwić klasyfikację, dokonywaną dotychczas na podstawie składu chemicznego.

## 2 MATERIAŁ I METODY

Materiałem badań były korzenie marchwi jadalnej odmian: Florida, Kathmandu, Kazan, Laguna, Mazurska, Recoleta, Sugarsnax, pochodzące z plantacji RZD w Żelaznej, z dwóch kolejnych lat zbiorów: 2005 i 2006. Odmiany Florida, Kazan, Kathmandu i Recoleta charakteryzowały się korzeniem typu Flakee, odmiana Laguna korzeniem typu Nantes, a odmiana Sugarsnax korzeniem typu Imperator. Korzenie badanych odmian pobierano losowo z pola.

W każdym roku badań dla odmian oznaczono: masę suchej substancji, popiół, pektyny ogółem, ekstrakt, cukry ogółem i redukujące, witaminę C, karotenoidy ogółem oraz  $\beta$ -karoten.

Parametry barwy korzeni oraz udział rdzenia otrzymano z ich obrazów utrwalonych aparatem cyfrowym. Korzenie myto i rozcinano na pół wzdłuż osi podłużnej, a następnie fotografowano powierzchnie ich przekroju.

Wszystkie obliczenia wykonano w programie *STATISTICA* [19].

### 2.1 Rejestracja obrazów korzeni marchwi

Zdjęcia wykonano w warunkach bezcieniowych, aparatem cyfrowym OLYMPUS 5050Z, wyposażonym w matrycę CCD 1/1,8'' o efektywnej liczbie pikseli 5 000 000 oraz obiektyw o długości ogniskowej 7,1÷21,3 mm (odpowiednik obiektywu o ogniskowej 35÷105 mm w aparacie małoobrazkowym 35 mm) i jasności f1,8÷f2,6. Obiekty umieszczano w odległości 87 cm od obiektywu aparatu i oświetlano źródłem światła o temperaturze barwowej 5000 K. Przed wykonaniem zdjęć dokonywano kalibracji aparatu, poprzez ustawienie balansu bieli na wzornik. Wszystkie zdjęcia wykonano w kolorze, przy czułości 100 ISO, ogniskowej 105 mm i przysłonie f2,8. Obrazy zapisano w formacie ORF (Olympus RAW File) w rozdzielczości 2560×1920 pikseli. Zapisanie obrazu typu RAW odpowiadało zapisaniu stanu matrycy elementów światłoczułych aparatu, czyli danych surowych.

## 2.2 Komputerowa analiza zarejestrowanych obrazów

Zdjęcia zapisane w formacie RAW zostały wczytane z karty pamięci aparatu do komputera, za pomocą programu Adobe® Camera Raw, będącego elementem oprogramowania Adobe® Photoshop® CS [2]. Do wczytania zdjęć wykorzystano pliki metadanych (ang. *metadata*), dołączone do każdej fotografii przez oprogramowanie aparatu cyfrowego. Zdjęcia wczytano do przestrzeni sRGB, a następnie wyodrębniono z tła widoczne na nich korzenie marchwi. Po wycięciu tła zdjęcia zostały zapisane jako mapy bitowe o rozmiarach 2560×1920 pikseli i rozdzielczości 300 dpi, z głębią 24 bity.

Określono długość i szerokość każdego korzenia oraz ich walca osiowego, zgodnie z metodą opisaną przez Horgana [8]. Wykonane pomiary wykorzystano do ekstrapolacji objętości korzeni i ich walców osiowych przy założeniu stożkowatego kształtu korzeni. Udział rdzenia wyrażono, jako procentowy stosunek objętości walca osiowego do objętości całego korzenia.

Przy pomocy autorskiego programu napisanego w języku C# odczytano składowe barwy RGB każdego piksela. Na ich podstawie wyznaczono składowe barwy dla przestrzeni CIE Lab [14].

## 2.3 Klasyfikacja korzeni marchwi

Klasyfikację korzeni marchwi oparto na sztucznych sieciach neuronowych, które umożliwiają modelowanie złożonych systemów z dużą liczbą zmiennych opisujących. Opinię tę potwierdził Trajer [22] wykazując, że w przypadku kiedy zależności między badanymi cechami są trudne do sformalizowania, a problem ma charakter złożony i wielowymiarowy, modelowanie neuronowe daje zadowalające rezultaty. Właściwą klasyfikację korzeni marchwi poprzedzono wyodrębnieniem grup obiektów o podobnym składzie chemicznym. Pojedyncza grupa (skupienie) stanowiła w dalszych etapach klasę obiektów, którą wykorzystano jako wzorzec.

### 2.3.1 Klasyfikacja bezwzorcowa korzeni marchwi

Ze względu na brak jasno sprecyzowanych i sformalizowanych wymagań, dotyczących cech surowca przeznaczanego na określone cele przetwórcze założono, iż punktem wyjścia do

oceny przydatności przetwórczej marchwi będzie klasyfikacja bezwzorcowa. Jej kryterium stanowiły cechy składu chemicznego. Założono również, że predyktorami klas przeznaczenia będą dane uzyskane w komputerowej analizie obrazu. Ze względu na niewielką liczbę badanych odmian konieczne było, aby algorytm klasyfikacji nie był wrażliwy na ograniczoną liczbę przypadków w zbiorze danych. W tym przypadku przydatne mogą być sieci Kohonena i SVM, opinię tę potwierdzili Sałat i Trajer [16].

Do przeprowadzenia analizy skupień wykorzystano samoorganizującą się mapę cech, zwaną od nazwiska swojego twórcy siecią Kohonena [10]. Dane liczbowe, wprowadzane na jej wejścia, poddano standaryzacji. Sieć miała cztery neurony w warstwie radialnej, które utworzyły mapę cech o wymiarach 2×2. Każdy neuron reprezentował osobną klasę, do której przypisano przypadki, prezentowane w ciągu uczącym. Na wejścia sieci wprowadzono zmienne charakteryzujące skład chemiczny korzeni marchwi (masę suchej substancji (SM), popiół (POP), pektyny (PEK), ekstrakt (EKS), cukry ogółem (C\_OG), cukry redukujące (C\_RED), witaminę C (WIT\_C), karotenoidy ogółem (KAR\_OG), β-karoten (B\_KAR)). Uczenie przebiegało według algorytmu Epanechnikova z metryką max (Osowski, 1996).

### 2.3.2 Klasyfikacja korzeni marchwi metodą wektorów nośnych

Informacje o przydzieleniu obiektów do klas wykorzystano jako wzorzec dla sieci SVM [13]. Jej zadaniem była prawidłowa klasyfikacja korzeni marchwi do wyodrębnionych wcześniej klas, ale tylko na podstawie danych uzyskanych z cyfrowych obrazów tych korzeni, czyli barwy i udziału rdzenia. Do klasyfikacji wykorzystano metodę ni-SVM (ν-SVM), z radialnym typem jądra (RBF). Dane wprowadzane do sieci podzielono na dwa zbiory: uczący i testowy. Zbiory te zawierały odpowiednio 75% i 25% obserwacji. Na wejścia sieci wprowadzono ciąg uczący, w którego skład weszły parametry barwy R, G, B i L, a, b oraz udział rdzenia (UR) po standaryzacji. Uczenie modelu SVM poprzedzono dziesięciokrotną walidacją krzyżową w celu doboru optymalnych wartości parametrów ν oraz gamma (γ). Proces uczenia sieci obejmował tysiąc iteracji, a warunkiem

zatrzymania uczenia było osiągnięcie błędu na poziomie 0,001.

### 2.3.3 Wizualizacja i identyfikacja cech korzeni marchwi z wykorzystaniem samoorganizującej się mapy cech

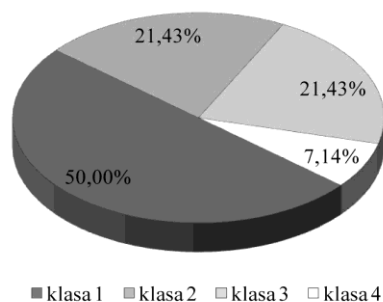
Zmienne wprowadzone na wejścia sieci SVM wykorzystano również w procesie uczenia samoorganizującej się mapy cech, która posłużyła jako narzędzie do wizualizacji danych i identyfikacji cech korzeni marchwi. Zmienną wyjściową była klasa przypisana w analizie skupień. Neurony w warstwie radialnej sieci utworzyły mapę cech o wymiarach 15×15. Dane podzielono na zbiory uczący i testowy, które zawierały odpowiednio 75% i 25% obserwacji. Uczenie przebiegało według klasycznego algorytmu Kohonena.

Po zakończeniu uczenia neuronom w warstwie radialnej nadano etykiety metodą K-najbliższych sąsiadów. Po nauczeniu sieci poprawnego rozpoznawania struktury prezentowanych danych oznaczono na mapie obszary, w których skupiły się obiekty podobne pod względem składu chemicznego, barwy i udziału rdzenia.

## 3 OMÓWIENIE WYNIKÓW

### 3.1 Klasyfikacja bezwzorcowa korzeni marchwi

Wynikiem przetwarzania danych, charakteryzujących skład chemiczny badanych odmian marchwi przez samoorganizującą się mapę cech, było wyodrębnienie skupień (klas) obiektów o podobnych cechach. Za klasę pojedynczego obiektu przyjęto neuron, który w procesie uczenia sieci okazał się neuronem zwycięskim. Liczność obiektów w poszczególnych skupieniach przedstawiono na rys. 1.



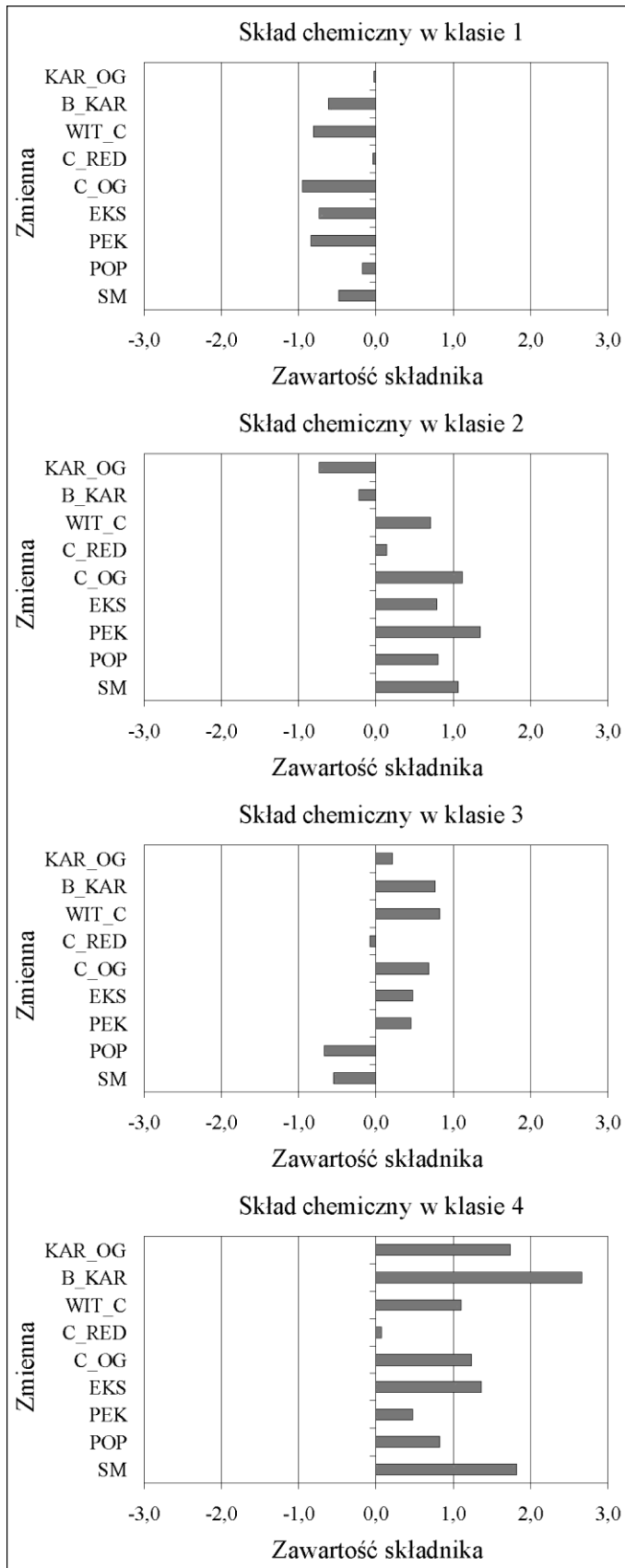
Rys. 1. Procentowy udział obiektów w klasach wyodrębnionych przez sieć Kohonena.

Dla każdego skupienia wyznaczono średnie wartości zmiennych charakteryzujących skład chemiczny i odniesiono do średnich zawartości oznaczonych substancji w całym zbiorze danych (rys. 2). Pozwoliło to obserwować zróżnicowanie klas pod względem składu chemicznego. W skupieniach wyznaczono również średnie wartości składowych barwy oraz średni udział rdzenia (rys. 3). Przedstawione w ten sposób informacje umożliwiły przeprowadzenie szczegółowej charakterystyki klas.

Marchew w klasie pierwszej charakteryzowała się znacznie niższą niż przeciętna masą suchej substancji, zawartością popiołu, pektyn, ekstraktu, cukrów ogółem, witaminy C oraz karotenoidów ogółem. Zawartość cukrów redukujących oraz  $\beta$ -karotenu była w tej klasie zbliżona do przeciętnej zawartości tych składników. Zawartość żadnego ze składników nie przekraczała odchylenia standardowego od średniej ilości oznaczanych substancji. W tej klasie znalazła się marchew o mniejszym niż przeciętny udziale rdzenia, której barwa charakteryzowała się mniejszą niż średnia jasnością oraz intensywnością bodźców zielonego i niebieskiego. Intensywność bodźca czerwonego była w tej klasie nieco wyższa od przeciętnej. Większymi od średniej wartościami charakteryzowały się również składowe *a* i *b*. Marchew była ciemniejsza, a jej barwa była przesunięta w stosunku do przeciętnej w kierunku żółci i czerwieni o czym świadczyły dodatnie odchylenia składowych *a* i *b* od ich wartości średnich.

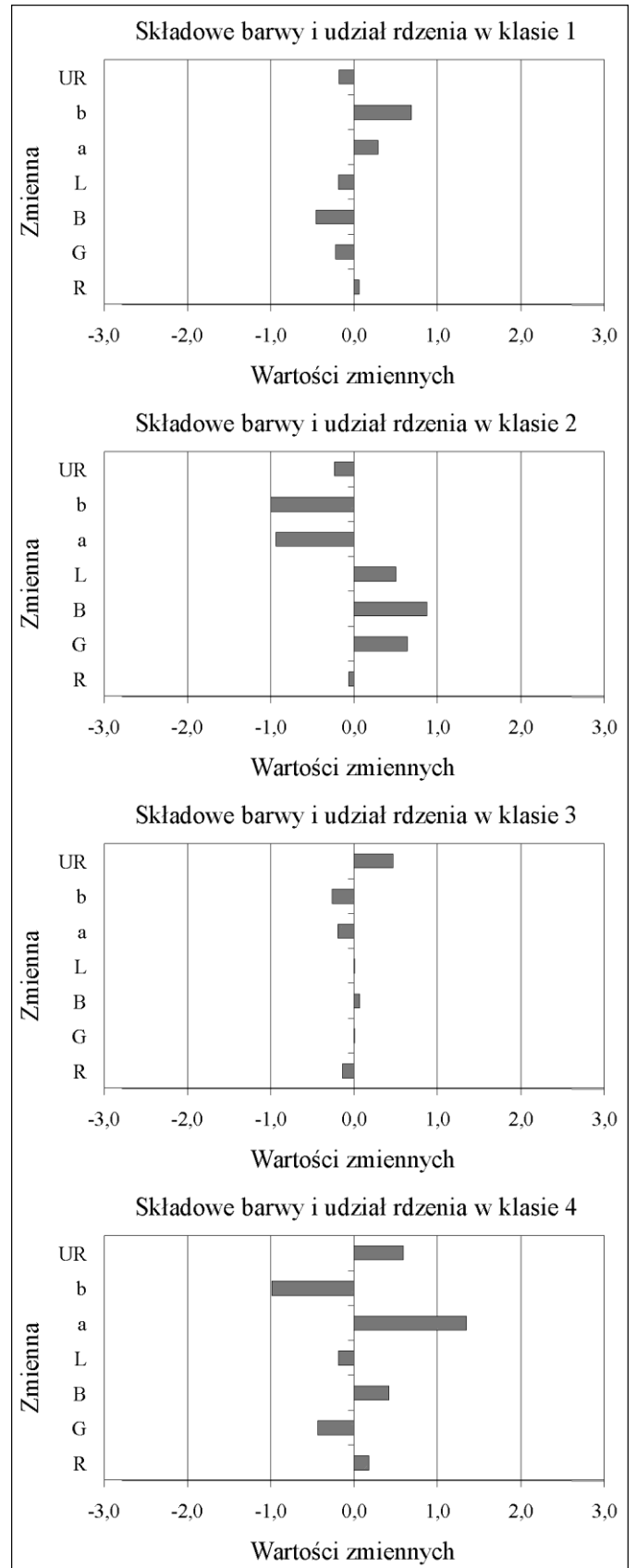
Marchew w klasie drugiej charakteryzowała się znacznie wyższą niż średnia zawartością składników chemicznych. Wyjątek stanowiły karotenoidy ogółem oraz  $\beta$ -karoten, których poziom był niższy od średniego. Zawartość  $\beta$ -karotenu była niższa, a karotenoidów ogółem wyższa niż w klasie pierwszej. Masa suchej substancji oraz zawartość cukrów ogółem i pektyn przewyższały średnią zawartość tych substancji o więcej niż jedno odchylenie standardowe. Marchew charakteryzowała się najmniejszym, w porównaniu do innych klas, udziałem rdzenia, a jej barwa najmniejszymi wartościami składowych *a* i *b*. Jasność barwy w tej klasie była większa od przeciętnej i jednocześnie największa w porównaniu do pozostałych klas, podobnie jak intensywności bodźców niebieskiego i zielonego. Intensywność bodźca czerwonego była mniejsza od przeciętnej. Barwa obiektów w tej klasie była najjaśniejsza, ale przesunięta

w stosunku do przeciętnej w kierunku zieleni i błękitu o czym świadczyły ujemne odchylenia składowych *a* i *b* od ich wartości średnich.



Rys. 2. Średnia zawartość składników chemicznych w klasach wyodrębnionych przez SOM.

W klasie trzeciej korzenie marchwi miały niższą niż średnia masę suchej substancji i zawartość popiołu oraz zbliżoną do średniej zawartość cukrów redukujących.



Rys. 3. Średnie wartości składowych barwy oraz udział rdzenia w klasach wyodrębnionych przez SOM.

Zawartość popiołu i masa suchej substancji w przypadku tej klasy były mniejsze niż w klasie pierwszej. Klasa trzecia charakteryzowała się najmniejszą, w porównaniu do pozostałych klas, zawartością cukrów redukujących. Ilości pozostałych składników przekraczały przeciętną zawartość, ale mieściły się w granicach odchylenia standardowego. W tej klasie znalazły się korzenie, które zawierały mniej pektyn, ekstraktu oraz cukrów ogółem i jednocześnie więcej witaminy C niż korzenie w klasie drugiej. Udział rdzenia był w tej klasie wyższy niż przeciętnie, podobnie jak wartości składowych barwy *B* i *G*, przy czym były to wartości niższe niż w klasie drugiej. Wartość składowej *R* była niższa od przeciętnej i jednocześnie najniższa w porównaniu do pozostałych klas. Niższymi niż średnie wartościami charakteryzowały się również składowe barwy *a* i *b*, ale w porównaniu do klasy drugiej składowe te miały mniejsze odchylenie. Marchew w tej klasie miała średnią jasność, a jej barwa była przesunięta w stosunku do przeciętnej w kierunku zieleni i błękitu, ale nie tak silnie jak w klasie drugiej.

Marchew w klasie czwartej wyróżniała się dużą zawartością wszystkich oznaczonych substancji. Korzenie zawierały znaczne ilości karotenoidów ogółem i  $\beta$ -karotenu — najwięcej w stosunku do pozostałych klas. Podobnie było w przypadku masy suchej substancji, witaminy C, ekstraktu oraz cukrów ogółem. Ze względu na ilość popiołu klasa czwarta wykazywała podobieństwo do klasy drugiej, a pod względem zawartości pektyn do klasy trzeciej. Marchew w tej klasie zawierała mniej cukrów redukujących niż marchew w klasie drugiej, ale wyróżniała się największym, w porównaniu do innych klas, udziałem rdzenia oraz najwyższymi wartościami składowych *a* i *R*. Wartość składowej *b* była niższa od przeciętnej i zbliżona do wartości tej składowej w klasie drugiej. Jasność barwy była niższa od przeciętnej i zbliżona do jasności w klasie pierwszej. Klasa czwarta charakteryzowała się najniższą, spośród wszystkich klas, intensywnością bodźca zielonego. Wartość składowej *B* przewyższała średnią, ale była mniejsza niż w klasie drugiej. Barwa obiektów w tej klasie była ciemniejsza (podobnie jak w klasie pierwszej) i przesunięta w stosunku do przeciętnej w kierunku żółci i błękitu.

### 3.2 Klasyfikacja korzeni marchwi metodą wektorów nośnych (SVM)

Klasy, które zostały wyodrębnione w trakcie analizy skupień, były wyraźnie zróżnicowane pod względem cech, które charakteryzowały skład chemiczny korzeni marchwi.

Charakterystyka klas pod względem składowych barwy i udziału rdzenia wykazała, że na podstawie tych cech można różnicować utworzone skupienia, bez potrzeby podawania informacji o składzie chemicznym. Skuteczność klasyfikacji sprawdzono za pomocą sieci SVM. W procesie jej uczenia, jako zmienne wejściowe, wykorzystano dane charakteryzujące barwę i udział rdzenia. Dobór parametrów  $\nu$  oraz  $\gamma$ , których wartości wyniosły odpowiednio 0,4 i 0,1, poprzedzono dziesięciokrotną walidacją krzyżową.

Błędy popełnione przez sieć, w trakcie określania przynależności obiektów ze zbioru testowego do zdefiniowanych wcześniej klas, stanowiły podstawę oceny jakości jej działania (tabela 1). Trafność klasyfikacji danych w zbiorze uczącym wyniosła 91,43%, a w zbiorze testowym 94,29%.

Tabela 1. Trafność klasyfikacji obiektów przez sieć SVM (zbiór testowy).

Klasa	Procentowy udział poprawnie zaklasyfikowanych obiektów	Procentowy udział błędnie zaklasyfikowanych obiektów
1	96,67	3,33
2	88,89	11,11
3	90,00	10,00
4	100,00	0,00

Liczba wektorów związanych wyniosła 7. Największe błędy klasyfikacji wystąpiły w przypadku klasy drugiej i trzeciej. Około 89% obiektów z klasy drugiej i 90% obiektów z klasy trzeciej zostało błędnie przypisanych do swoich klas. Sieć SVM rozpoznała prawidłowo blisko 97% obiektów należących do klasy pierwszej oraz wszystkie obiekty należące do klasy czwartej.

Z tabeli 2 wynika, że obiekty z klasy pierwszej były błędnie przypisywane do klasy trzeciej, a obiekty z klasy trzeciej były mylone z przedstawicielami klasy drugiej. Sieć nie rozpoznała również części obiektów należących do klasy drugiej i przypisała je błędnie do klasy pierwszej lub trzeciej.

Tabela 2. Macierz pomyłek popełnionych przez sieć SVM.

Klasa obserwowana	Przewidywany przez sieć udział obiektów w klasach [%]			
	1	2	3	4
1	97	0	3	0
2	6	89	6	0
3	0	10	90	0
4	0	0	0	100

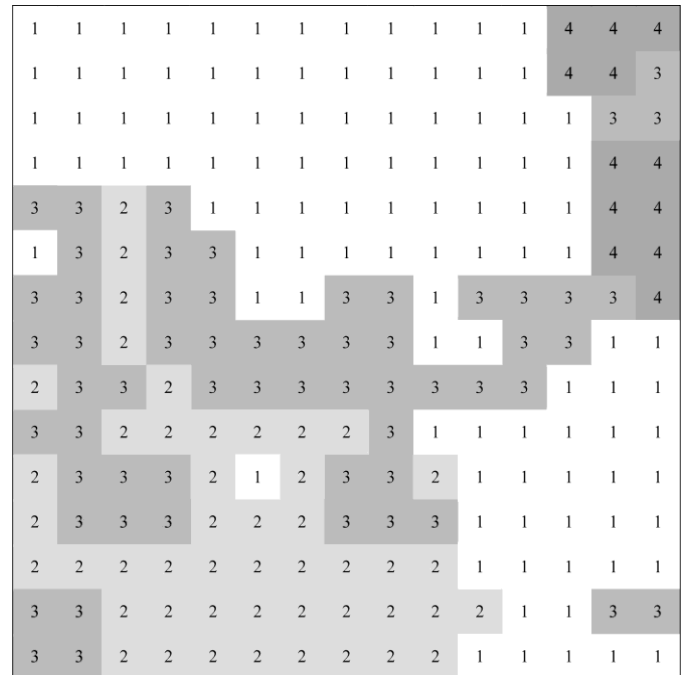
Błędy wygenerowane w czasie klasyfikacji wskazywały na to, że cechy charakteryzujące barwę i udział rdzenia nie różnicowały klas tak dokładnie jak cechy składu chemicznego.

### 3.3 Wizualizacja i identyfikacja cech korzeni marchwi z wykorzystaniem samoorganizującej się mapy cech

Informacje o barwie i udziale rdzenia wykorzystano do utworzenia mapy rozkładu cech, charakteryzujących zawartość oznaczonych substancji chemicznych w korzeniach marchwi. Podczas uczenia samoorganizującej się mapy cech zbiór neuronów radialnych został podzielony na obszary (klastery), w których neurony wykazywały minimalne zróżnicowanie pod względem wartości wag. W procesie samoorganizacji na mapie cech zostały wyłonione neurony zwycięskie oraz neurony będące ich sąsiadami i o zbliżonych do zwycięskich charakterystykach. To zjawisko wykorzystano do przypisania neuronom w warstwie radialnej etykiet, określających przynależność do jednej z czterech zdefiniowanych wcześniej klas (rys. 4). Poprawność klasyfikacji oceniono na podstawie wyników dla zbioru testowego (tabela 3).

Na mapie dość wyraźnie wyodrębniły się dwa obszary. Pierwszy z nich, rozpoczynający się od prawego górnego rogu mapy i rozciągający nieco poza jej przekątną, utworzyły klastery, którym przypisano etykiety „1” i „4”.

Klaster z numerem czwartym odpowiadał zatem charakterystyce klasy czwartej, a klaster z numerem pierwszym miał charakterystykę klasy pierwszej. Pozostały obszar mapy obejmował klastery z etykietami „2” i „3”, którym odpowiadały charakterystyki klas drugiej i trzeciej. Klaster trzeci utworzył pewnego rodzaju klin, rozdzielając obszar pierwszego klastera na dwa mniejsze.



Rys. 4. Mapa rozkładu klas o wymiarach 15 × 15.

Tabela 3. Trafność klasyfikacji obiektów przez SOM o wymiarach 15×15.

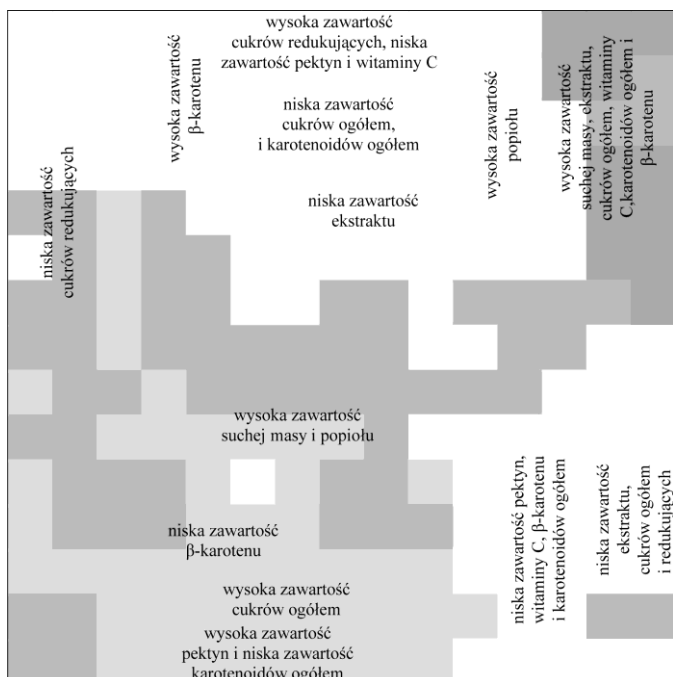
Klasa	Procentowy udział poprawnie zaklasyfikowanych obiektów	Procentowy udział błędnie zaklasyfikowanych obiektów	Procentowy udział obiektów nieznanych
1	95,45	4,55	0,00
2	100,00	0,00	0,00
3	95,45	4,55	0,00
4	100,00	0,00	0,00

Na podstawie informacji o rozmieszczeniu obiektów w klasach utworzono mapę rozkładu cech charakteryzujących skład chemiczny korzeni (rys. 5).

Prezentacja danych na rys. 5 pozwoliła na zidentyfikowanie w obrębie klasterów obszarów, które reprezentowały szczególne cechy składu chemicznego korzeni marchwi.

W klasterze pierwszym i drugim zidentyfikowano obszary, które reprezentowały wysoką zawartość popiołu, przy czym obszar w klasterze drugim pokrył się z obszarem wysokiej masy suchej substancji.

Wysoką zawartość pektyn reprezentował na mapie obszar, znajdujący się w obrębie klastera drugiego, w klasterze pierwszym natomiast znalazły się dwa obszary, reprezentujące niską zawartość (niższą od wartości średniej) tych substancji.



Rys. 5. Mapa rozkładu cech składu chemicznego w klasach.

Pierwszy zlokalizowany był w górnej części mapy, drugi natomiast w jej dolnym prawym rogu.

Wysoką zawartość ekstraktu zaobserwowano w obszarze klastra czwartego, a niską w dwóch oddalonych od siebie obszarach, należących do klastra pierwszego i pokrywających się częściowo z obszarami niskiej zawartości pektyn.

Obszary reprezentujące wysoką zawartość cukrów ogółem zidentyfikowano w klastrach czwartym i drugim, przy czym obszar w klastrze czwartym pokrywał się dokładnie z zawartością suchej masy i ekstraktu. Niską zawartość tych substancji reprezentowały na mapie dwa obszary, należące do klastra pierwszego, przy czym obszar zlokalizowany w dolnym prawym rogu mapy pokrywał się z niską zawartością ekstraktu.

W obrębie górnej części klastra pierwszego zlokalizowano obszar, który reprezentował wysoką zawartość cukrów redukujących. W tym samym klastrze zidentyfikowano dwa obszary, które reprezentowały niską zawartość tych substancji. Pierwszy z nich zlokalizowano w dolnej części mapy. Drugi znajdował się w jej górnym lewym rogu i okazał się wspólny również dla klastra trzeciego.

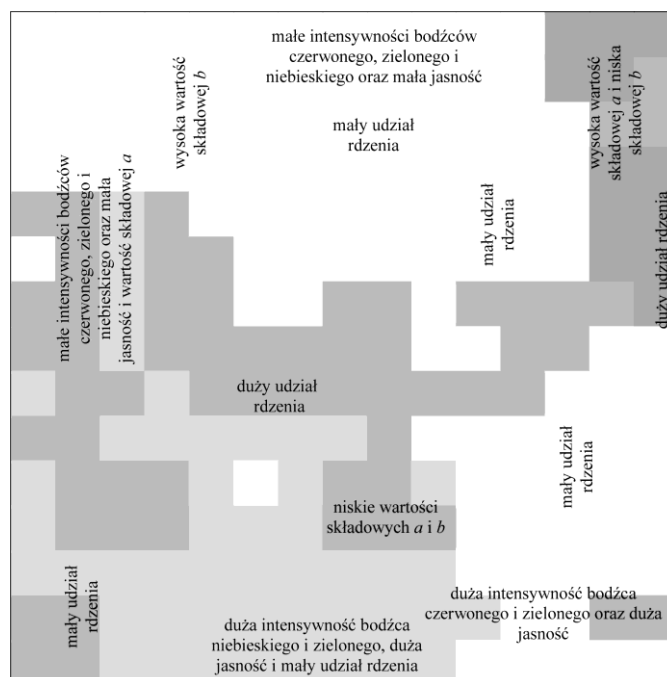
W obrębie klastra czwartego, w obszarze wysokiego ekstraktu, cukrów ogółem i dużej masy suchej substancji, zidentyfikowano również obszar, który reprezentował wysoką zawartość witaminy C. W klastrze pierwszym

znalazły się natomiast dwa obszary niskiej zawartości tej substancji. Oba pokrywały się z obszarem niskiej zawartości pektyn.

Wysoką zawartość karotenoidów ogółem reprezentował obszar, znajdujący się w obrębie czwartego klastra. Ponadto na mapie znalazły się trzy oddalone od siebie obszary, które reprezentowały niską zawartość karotenoidów ogółem. Jeden z nich znajdował się w środkowej części klastra pierwszego i częściowo pokrywał się z obszarem niskiej zawartości cukrów ogółem. Kolejny zlokalizowany był w dolnej części tego samego klastra i pokrywał się z obszarem niskiej zawartości pektyn i witaminy C. Trzeci obszar znajdował się w dolnej części mapy, w klastrze drugim.

Na mapie zlokalizowano również obszary wyraźnie różniące się pod względem zawartości β-karotenu. W górnej części mapy, w klastrze czwartym i w niewielkiej części klastra pierwszego znalazły się obszary reprezentujące wysoką zawartość tej substancji. U dołu mapy, w obszarze klastra drugiego i w części klastra pierwszego, zidentyfikowano obszary o niskiej zawartości β-karotenu.

W podobny sposób przedstawiono na mapie obszary, w których zgrupowały się obiekty o zbliżonych cechach barwy i udziale rdzenia (rys. 6).



Rys. 6. Mapa rozkładu cech barwy i udziału rdzenia w klasach.



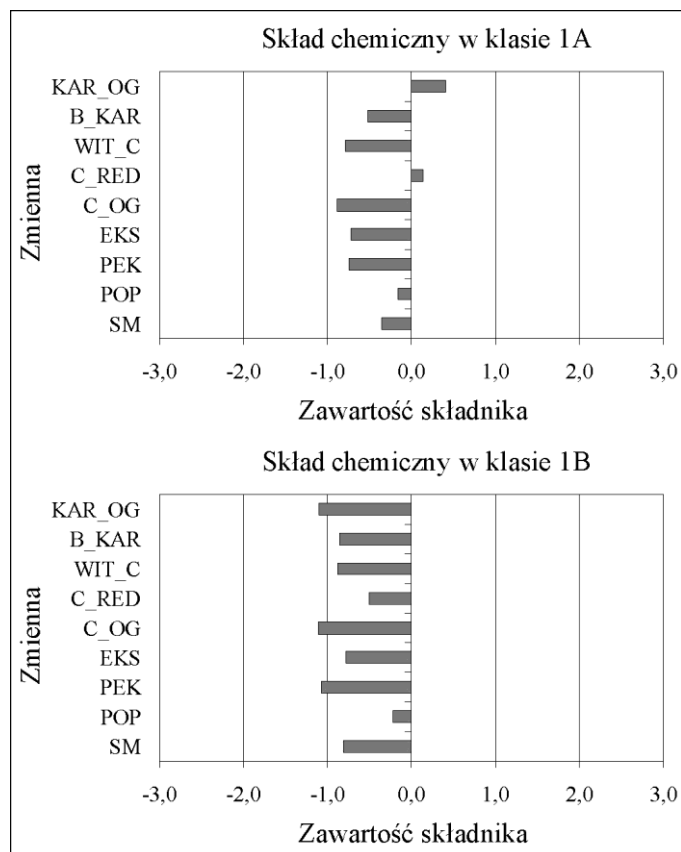
W prawym dolnym rogu mapy zlokalizowano obszary charakteryzujące się wysokimi wartościami składowych: R, G, B i L. Wartości tych składowych zmniejszały się w kierunku górnej krawędzi mapy. W klasterze drugim powstał obszar, który charakteryzował się wysokimi wartościami składowych G i B oraz dużą jasnością.

Obszar reprezentujący wysokie wartości składowych R, G i L zlokalizowano w dolnej części klastra pierwszego. Obszary charakteryzujące się niskimi wartościami składowych R, G, B i L powstały w klasterze trzecim oraz w górnej części klastra pierwszego. W klasterach drugim, trzecim i w dolnej części klastra pierwszego znalazły się obszary o małych wartościach składowych a i b. W lewym górnym rogu mapy powstał obszar, który charakteryzował się wysoką wartością składowej b, co oznaczało, że barwa korzeni była tam bardziej żółta niż w dolnej części mapy. W prawym górnym rogu mapy, w klasterze czwartym i w części klastra pierwszego barwa korzeni była z kolei mniej zielona (bardziej czerwona) i mniej żółta (bardziej niebieska) od barwy w dolnej części mapy, o czym świadczyła wysoka wartość składowej a i niska wartość składowej b.

Na mapie zlokalizowano również dwa obszary, które reprezentowały wysoki udział rdzenia. Pierwszy z nich znajdował się w środkowej części mapy, w klasterze trzecim, drugi natomiast w klasterze czwartym przy prawej krawędzi mapy. Zarówno w górnej, jak i w dolnej części klastra pierwszego, w klasterze drugim oraz przy lewej krawędzi mapy, w jej dolnym rogu znalazły się obszary reprezentujące mały udział rdzenia.

Rozmieszczenie klastrów na rys. 3 wskazywało, że narzucony podczas klasyfikacji bezwzorcowej podział na cztery kategorie (klasy) uniemożliwił rozdzielenie obiektów z klasy pierwszej na dwa osobne skupienia. Różnice w strukturze danych w klasie pierwszej były widoczne dopiero na mapie o wymiarach 15×15. Klaster pierwszy został tam wyraźnie rozdzielony przez klaster trzeci na dwa obszary, różniące się zarówno zawartością substancji chemicznych, jak i barwą. Analiza rozmieszczenia przedstawicieli badanych odmian na mapie cech wykazała, że w górnej części klastra pierwszego znalazły się odmiany: Florida, Kathmandu, Kazan, Recoleta i Sugarsnax. W jego dolnej części, oddzielonej przez klaster trzeci, znalazły

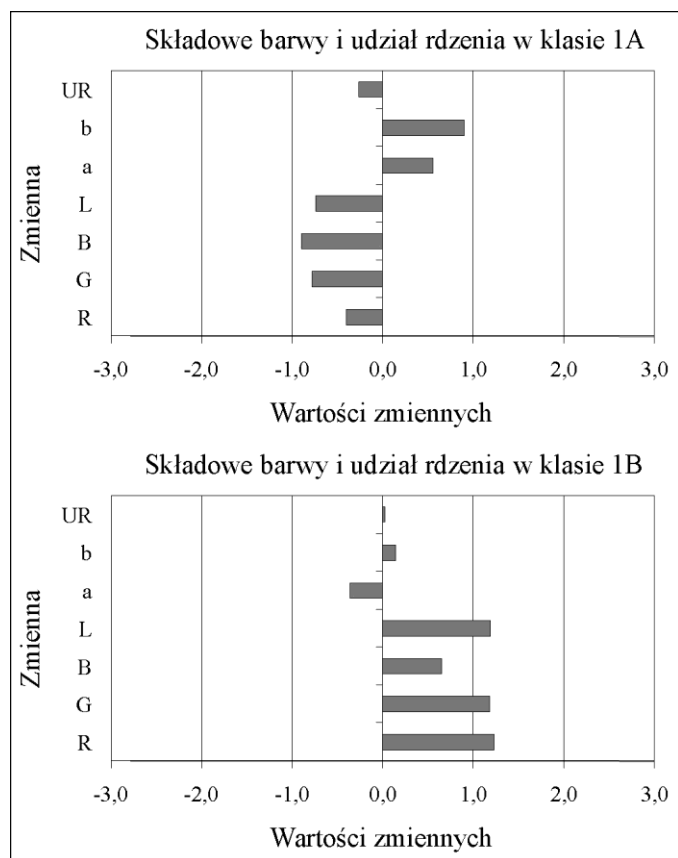
się odmiany Laguna oraz Mazurska. Rozdzielone części klastra pierwszego, przeanalizowano ponownie, rozpatrując je jako klasy 1A i 1B. Średnie wartości zmiennych, charakteryzujących skład chemiczny, barwę i udział rdzenia w tych klasach przedstawiono na rys. 7 i 8.



Rys. 7. Średnie wartości zmiennych, charakteryzujących skład chemiczny w klasach 1A i 1B

W klasie 1A znalazła się marchew o znacznie niższej niż przeciętna zawartości oznaczonych substancji chemicznych z wyjątkiem  $\beta$ -karotenu oraz cukrów redukujących, których poziom przekroczył wartość średnią. Zawartość żadnego ze składników nie przekraczała odchylenia standardowego od średniej ilości oznaczonych substancji. Korzenie marchwi w tej klasie wyróżniały się najmniejszym udziałem rdzenia, a jej barwa charakteryzowała się mniejszymi niż średnia, a zarazem najmniejszymi spośród wszystkich klas wartościami składowych: R, G, B i L. Barwa korzeni w tej klasie była najciemniejsza i przesunięta w stosunku do przeciętnej w kierunku żółci i czerwieni, o czym świadczyły dodatnie odchylenia składowych a i b od ich wartości średnich.

Marchew w klasie 1B charakteryzowała się najniższą spośród wszystkich klas zawartością oznaczonych substancji chemicznych.



Rys. 8. Średnie wartości zmiennych, charakteryzujących barwę i udział rdzenia w klasach 1A i 1B.

Wyjątek stanowiła zawartość popiołu, która była nieco niższa od ilości tej substancji w klasie 1A. Zawartość pektyn, cukrów ogółem i  $\beta$ -karotenu przekroczyły odchylenie standardowe od średniej ilości tych substancji.

Marchew w tej klasie wyróżniała się średnim udziałem rdzenia, a jej barwa charakteryzowała się największymi spośród wszystkich klas wartościami składowych R, G i L oraz ponadprzeciętną wartością składowej B. Barwa korzeni w tej klasie była najjaśniejsza i przesunięta w stosunku do przeciętnej w kierunku żółci i zieleni, o czym świadczyło ujemne odchylenie od wartości średniej składowej a i dodatnie odchylenie składowej b.

#### 4 PODSUMOWANIE

Proponowana metoda klasyfikacji marchwi spełnia wszystkie sformułowane wcześniej założenia. Klasy, do których kwalifikowano poszczególne

ogólne obiekty, zostały wyłonione drogą klasyfikacji bezwzorcowej, na podstawie informacji o składzie chemicznym korzeni marchwi, gdyż jest on uważany za główny determinant przydatności przetwórczej [24]. Docelowo identyfikację cech obiektów przeprowadzono na podstawie informacji o barwie i udziale rdzenia, a więc w oparciu o dane pochodzące z komputerowej analizy obrazu.

Uzupełnienie klasyfikacji stanowiła wizualizacja z zastosowaniem samoorganizującej się mapy cech, na której bardziej widoczne były różnice między klasami, a także między grupami obiektów w poszczególnych klasach. Umożliwiło to szczegółowe zidentyfikowanie cech tych obiektów.

Klasyfikacja korzeni marchwi, przeprowadzona zarówno z wykorzystaniem danych pochodzących z komputerowej analizy obrazu, jak i danych o składzie chemicznym, dała zbieżne wyniki. Daje to podstawy do stwierdzenia, że w ocenie przydatności przetwórczej informacja o składzie chemicznym korzeni marchwi może zostać w zadowalającym stopniu zastąpiona przez cechy uzyskane w komputerowej analizie obrazu. Podobne wnioski, dotyczące możliwości dokonania klasyfikacji odmianowej marchwi na podstawie obrazu korzeni, sformułowali Horgan i wsp. [9].

Klasyfikacja korzeni marchwi bazująca na cechach wyodrębnionych z ich obrazów wydaje się być prostsza w realizacji. Liczba klas obiektów może być modyfikowana w zależności od potrzeb, co umożliwia przeprowadzenie klasyfikacji o wybranym stopniu szczegółowości. W zależności od potrzeb zbiór cech stanowiący podstawę klasyfikacji korzeni może zostać powiększony o dodatkowe zmienne.

Podstawę oceny przydatności przetwórczej marchwi powinien stanowić wzorzec, według którego przeprowadzana będzie klasyfikacja oraz bezpośrednia ocena przydatności przetwórczej marchwi. Wzorce takie, opracowane na podstawie przyjętych kryteriów dla wybranych form przeznaczenia marchwi, umożliwiłyby jej dokładniejszą klasyfikację.

Zastosowane narzędzia klasyfikacji w postaci sieci neuronowych umożliwiają wprowadzanie informacji o różnym charakterze (uzyskanych zarówno na podstawie bezpośrednich, jak i pośrednich metod oceny surowca), na podstawie których można określić podobieństwo między obiektami, pochodzącymi z różnych partii su-

rowca, różnych obszarów uprawnych lub będącymi przedstawicielami różnych odmian. Struktura oraz liczba wyłonionych skupień może ulegać zmianie w miarę wprowadzania nowych danych o korzeniach różnych odmian i pochodzących z różnych lat zbiorów.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Abbott J. A. 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15: 207-225.
- 2) Adobe Systems Incorporated. 2003. Adobe Photoshop CS. California 95110, 345 Park Avenue, San Jose, USA.
- 3) Baardseth P., Rosenfeld H. J., Sundt T. W., Skrede G., Lea P. & Slinde E. 1995. Evaluation of carrot varieties for production of deep-fried carrot chips-I. Chemical aspects. *Food Research International*, 28 (3), 195-200.
- 4) Baardseth P., Rosenfeld H. J., Sundt T. W., Skrede G., Lea P. & Slinde E. 1996. Evaluation of carrot varieties for production of deep-fried carrot chips-II. Sensory aspects. *Food Research International*, 28 (6), 513-519.
- 5) Blasco J., Aleixos N. & Moltó E. 2003. Machine vision system for automatic quality grading of fruit. *Biosystems Engineering*, 85, 415-423.
- 6) Budrewicz G., Majewska K., Borowska E. J., Zadernowski R. 2005. Texture characteristics of selected carrot varieties for the processing industry. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 14/55 (1), 57-62.
- 7) Du C.-J., Sun D.-W. 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in Food Science & Technology*, 15, 230-249.
- 8) Horgan G. W. 2001. The statistical analysis of plant part appearance - a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31, 169-190.
- 9) Horgan G. W., Talbot M. & Davey J. C. 2001. Use of statistical image analysis to discriminate carrot cultivars. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31, 191-199.
- 10) Kohonen T. 1988. *Self organization and associative memory*. Springer Verlag, New York.
- 11) Lewicki P. P. 1995. Zastosowanie komputerowej analizy obrazu w technologii żywności. *Przemysł Spożywczy*, 49 (5), 155-157.
- 12) McLellan M. R., Cash J. N. & Gray J. I. 1983. Characterization of the aroma of raw carrots (*Daucus carota* L.) with the use of factor analyses. *Journal of Food Science*, 48, 71-74.
- 13) Osowski S. 2002. Sieci neuronowe SVM w zastosowaniu do klasyfikacji wzorców. *Przegląd Elektrotechniczny*, 78 (2), 29-36.
- 14) PN-ISO 7724-1:2003. Polska Norma. Farby i lakiery. Kolorymetria. Część 1: Podstawy. Wyd. PKN.
- 15) Rosenfeld H. J., Martens M. & Lea P. 1984. Variations in sensory and physical characteristics in carrot (*Daucus carota* L.). *Acta Horticulturae*, 163, 63-70.
- 16) Sałat R., Trajer J. 2004. Identification of chemical composition on the basis of feature color using artificial neural networks. *Transactions of VI International Conference on Artificial Intelligence*, 23, 193-196.
- 17) Simon P. W., Lindsay R. C. 1983. Effects of processing upon objective and sensory variables of carrots. *Journal of the American Society for Horticultural Sciences*, 108, 928-931.
- 18) Skrede G., Nilsson A., Baardseth P., Rosenfeld H. J., Enersen G. & Slinde E. 1997. Evaluation of carrot varieties for production of deep-fried carrot chips-III. Carotenoids. *Food Research International*, 30 (1), 73-81.
- 19) StatSoft Inc. 2005. *STATISTICA* (Data Analysis Software System), version 7.1. Tulsa, OK: StatSoft.
- 20) Tadeusiewicz R. 1992. *Systemy wizyjne robotów przemysłowych*. WNT, Warszawa.
- 21) Talcott S. T., Howard L. R. & Brenes C. H. 2001. Factors contributing to taste and quality of commercially processed strained carrots. *Food Research International*, 34, 31-38.
- 22) Trajer J. 2001. Modelowanie procesu przechowywania warzyw w wybranych jego aspektach. *Rozprawy naukowe i monografie*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- 23) Varming C., Jensen K., Møller S., Brockhoff P. B., Christiansen T., Edelenbos M., Bjørn G. K. & Poll L. 2004. Eating quality of raw carrots-correlations between flavour compounds, sensory profiling analysis and consumer liking test. *Food Quality and Preference*, 15, 531-540.
- 24) Zadernowski R., Budrewicz G., Borowska E. J., Kaszubski W. 2003. Sok z marchwi naturalnie mętny – kryteria doboru surowca oraz optymalizacji procesu technologicznego (1). *Przemysł Fermentacyjny i Owocowo-Warzywny*, 5, 15-16.
- 25) Zapotoczny P., Zielińska M. 2005. Rozważania nad metodyką instrumentalnego pomiaru barwy marchwi. *Żywność*, 1 (42): 121-132.