

OCENA JAKOŚCI JABŁEK ZA POMOCĄ NISKOPÓŁOWEJ TOMOGRAFII MAGNETYCZNO-REZONANSOWEJ

Mateusz Suchanek¹, Zbigniew Olejniczak^{2,3}

¹Zakład Fizyki, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja, Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków

²Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego, Uniwersytet Jagielloński
ul. Reymonta 4, 30-059 Kraków

³Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk, ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków
e-mail: Mateusz.Suchanek@ar.krakow.pl

Streszczenie. Ocena jakości jabłek polega głównie na określeniu zmian strukturalnych tkanki owocu związanych ze zmianą rozkładu wody. Obrazowanie magnetyczno-rezonansowe (MR) jest nieinwazyjną metodą, która umożliwia badanie własności fizycznych wody w materiałach biologicznych, a zatem może być użyta do detekcji uszkodzeń mechanicznych i chorób wewnętrznych jabłek. Eksperymenty MR przeprowadzone zostały na niskopółowym tomografie w polu 0,088 T. Badano ewolucję czasową wewnętrznego brązowienia jabłek z wykorzystaniem sekwencji echa spinowego (SE) ze zmiennymi czasami echa (TE) i repetycji (TR). Porównano obrazy MR ważone gęstością protonową oraz czasem relaksacji T_2 . W celu skrócenia czasu akwizycji danych użyto również szybkich sekwencji obrazowania, takich jak metoda FSE, czy ultraszybka sekwencja FLASH, otrzymując we wszystkich przypadkach taki sam rozkład przestrzenny zmienionej chorobowo tkanki owocu.

Słowa kluczowe: tomografia magnetyczno-rezonansowa, obrazowanie, jabłka, jakość

WSTĘP

Choroby fizjologiczne przechowywanych jabłek prowadzą do pogorszenia ich jakości, a nawet do zniszczenia. Ze względu na fakt, że jabłka, podobnie jak inne owoce i warzywa charakteryzują się pewną zmiennością cech fizycznych w zależności od ich rodzaju, potrzebne są nowe, niedestrukcyjne metody pomiarowe służące do oceny jakości niezależnie od ich odmiany i okresów przechowywania, tak aby można było je w łatwy i szybki sposób sortować. Wewnętrzna analiza jakości owoców może być przeprowadzona różnymi technikami (Abbott 1999). Przedmiotem obecnych badań jest jedna z tych metod: obrazowanie magnetyczno-rezonansowe (MR).

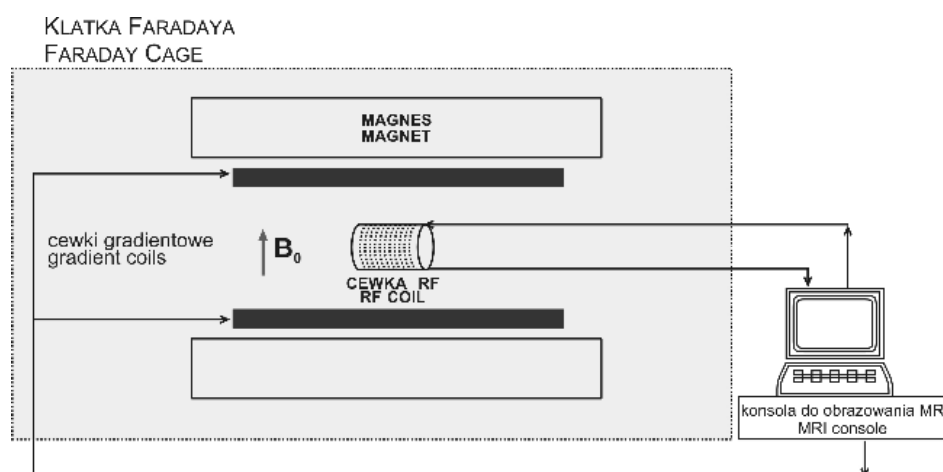
Obrazowanie MR jest nieinwazyjną metodą wykorzystującą zjawisko magnetycznego rezonansu jądrowego dla protonów w atomach wodoru, występujących pod postacią wody (Hennel 1999). Metoda ta pozwala na wizualizację zarówno przestrzennego rozkładu wody w obiektach biologicznych jak i ich anatomii. W tomografii MR, w próbce umieszczonej wewnątrz magnesu wytwarzającego jednorodne pole magnetyczne, pojawia się makroskopowa magnetyzacja. Generowany przez cewkę nadawczą impuls elektromagnetyczny (rf) o częstotliwości rezonansowej wywołuje precesję tej magnetyzacji z częstotliwością zależną od położenia, dzięki zastosowaniu dodatkowych, przestrzennie zmiennych pól magnetycznych generowanych przez cewki gradientowe. Precesja magnetyzacji indukuje sygnał w cewce odbiorczej, który po odpowiedniej obróbce matematycznej pozwala na otrzymanie przestrzennego obrazu gęstości wody w próbce. Ponadto, w trakcie eksperymentu w próbce zachodzą procesy relaksacji: relaksacja podłużna wywołana oddziaływaniem wzbudzonych protonów z otoczeniem (spin-sieć) jest opisywana czasem T_1 , natomiast relaksacja poprzeczna związana z oddziaływaniem wzajemnym wzbudzonych protonów jest opisywana czasem T_2 . Specjalnie opracowane sekwencje pozwalają na uzyskiwanie obrazów ważonych tymi czasami relaksacji, dostarczając dodatkowych informacji o własnościach fizycznych próbki.

Pierwsze doniesienie o możliwości wizualizacji szklistości mięszu jabłek metodą MR ukazało się już w 1988 roku (Wang i in. 1988), a rok później wykorzystano tą metodę do detekcji rozpadu chłodniczego w gruszkach (Wang i Wang 1989). W następnych latach nastąpił bardzo dynamiczny rozwój obrazowania MR w zastosowaniu do diagnostyki medycznej, co umożliwiło wykorzystanie tej metody również w przemyśle rolniczym (Clark i in. 1997, Faust i in. 1997). Pomiar obrazów ważonych czasami relaksacji T_1 , T_2 , pozwala na detekcję zarówno brązowień wewnątrz jabłek (Zion i in. 1995), lepsze kontrastowanie szklistości mięszu (Clark i in. 1998) jak i ocenę ich mączystości (Barreiro i in. 1999). Opisane powyżej eksperymenty przeprowadzane były na systemach MR wyposażonych w magnes nadprzewodzący wytwarzający wysokie pole magnetyczne. Realizacja badań wymaga wówczas dużych nakładów finansowych. Alternatywnym rozwiązaniem jest wykorzystanie w tych eksperymentach niskopolowych tomografów MR, dedykowanych do obrazowania owoców. Pozwoliłoby to na obniżenie kosztów zakupu i zminimalizowanie kosztów eksploatacji, co daje szansę na komercjalizację nowoczesnej metody diagnostycznej w przemyśle sadowniczym.

Celem przeprowadzonych badań była ocena przydatności niskopolowej tomografii MR do detekcji i monitorowania zmian chorobowych w jabłkach oraz określenie ograniczeń tej metody.

MATERIAŁY I METODY

Badaniu poddawano całe jabłka przypadkowych odmian, zakupione w sklepach lub na placach targowych. Ze względów technicznych średnica jabłek nie przekraczała 8 cm.



Rys. 1. Schemat niskopoleowego tomografu MR
Fig. 1. Schematic diagram of low field MRI system

Wszystkie eksperymenty przeprowadzone zostały w niskopoleowym tomografie MR znajdującym się w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego (Suchanek i in. 2005). Schemat tomografu przedstawiony został na rysunku 1. Centralną częścią tomografu jest magnes stały 0.088 T (*AMAG, Polska*) ze stabilizacją temperatury. Obszarem roboczym jest kula o średnicy 10 cm. Wewnątrz magnesu zamontowana została para biplanarnych, aktywnie ekranowanych cewek gradientowych (*Institute for Biomedical Research, NRC, Winnipeg, Canada*) o wydajności $30 \text{ mT} \cdot \text{m}^{-1}$ dla wszystkich trzech kierunków. Magnes wyposażony jest w solenoidalną cewkę nadawczo – odbiorczą o średnicy 8 cm, dostrojoną do częstotliwości 3,7 MHz. Praca wszystkich elementów systemu kontrolowana jest przez konsolę pomiarową MRRS MR4200 (*Magnetic Resonance Research System*), zintegrowaną z komputerem PC. Za pomocą konsoli programuje się i uruchamia sekwencje impulsów gradientowych i rf, a następnie rejestruje i analizuje sygnały przychodzące z detektora.

Do obrazowania wykorzystane zostały sekwencje: echa spinowego SE, całkowicie zrefazowanego szybkiego echa spinowego FSE, oraz ultraszybka technika FLASH (Haacke i in. 1999). Sekwencje te zaczerpnięte zostały ze standardowej biblioteki sekwencji będącej na wyposażeniu konsoli pomiarowej MRRS.

Wykonane zostały dwa rodzaje eksperymentów: badanie rozwoju choroby w czasie dla pojedynczego owocu, oraz obrazowanie serii jabłek w celu identyfikacji owoców zmienionych chorobowo.

Badanie postępów choroby w czasie

W pierwszej kolejności wykonano obraz kontrolny zdrowego owocu. W celu detekcji wczesnych zbrązowień miąższu, jabłko upuszczano swobodnie z niedużej wysokości na płaską powierzchnię. Następnie owoc umieszczany był w tomografie na okres tygodnia, gdzie w odstępach 24 godzinnych wykonywane były obrazy tego samego obszaru wnętrza jabłka. Grubość warstwy była ustalona i wynosiła 10 mm.

Jabłka obrazowane były przy użyciu sekwencji SE. Pole widzenia (FOV) wynosiło 120x120 mm, przy rozdzielczości 128x128 pikseli. Czas repetycji TR = 6000 ms był wielokrotnie dłuższy od zmierzonego czasu relaksacji T_1 wewnątrz owocu ($T_1 = 1300$ ms). Czas echa TE był zmienny, co pozwalało uzyskiwać zarówno obrazy ważone gęstością protonową, jak i czasem relaksacji T_2 . Przy zastosowanym paśmie częstości równym 50 kHz, parametr TE zmieniany był w przedziale od 14 ms do 180 ms. Ze względu na długi czas TR i konieczność akumulacji, typowy czas pojedynczego eksperymentu wynosił około 100 min.

Identyfikacja owoców zmienionych chorobowo

Materiał badawczy obejmował 20 owoców. Do obrazowania wykorzystana została ponownie sekwencja SE z nieznacznie zmienionymi parametrami: FOV = 125 × 125 mm, rozdzielczość 128 × 128 pikseli, pasmo 10 kHz, czas repetycji TR = 6000 ms, czas echa TE = 22 ms lub 160 ms, odpowiednio dla obrazów ważonych gęstością protonową lub czasem relaksacji T_2 . Grubość warstwy wynosiła 20 mm. Czas akwizycji wynosił około 100 min.

Każdorazowo po badaniu MR owoc przecinano w miejscu, w którym przeprowadzone zostało wcześniej obrazowanie i wykonywano fotografie kontrolne, przy użyciu aparatu cyfrowego HP photosmart 945. Zapisane w formacie RGB zdjęcia cyfrowe przetworzone zostały komputerowo zostawiając tylko kanał niebieski, który najbardziej kontrastuje zbrązowienia jabłek (Kuczyński 2005).

Po identyfikacji jabłek zmienionych chorobowo jeden z owoców został poddany dalszym badaniom mającym na celu przyspieszenie akwizycji danych. Sekwencja SE zastąpiona została sekwencją FSE, a następnie FLASH.

Istotne parametry zarówno sekwencji FSE, jak i FLASH pozostały bez zmian w stosunku do wcześniej użytej sekwencji SE. W przypadku techniki FSE zmieniony został czas echa i wynosił TE = 32 ms oraz czas efektywnego echa, który wynosił TEE = 160 ms. Parametry te zostały dobrane tak, aby uzyskane obrazy nosły podobne informacje do obrazów ważonych czasem relaksacji T_2 z użyciem sekwencji SE.

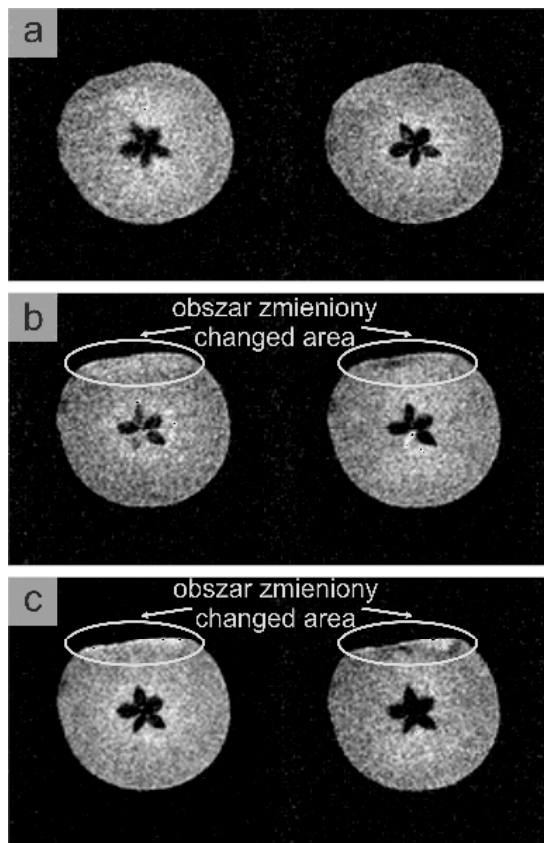
WYNIKI I DYSKUSJA

Na rysunku 2 przedstawiony został rozwój zbrązowienia wewnętrznego w obtłuczonym jabłku. Obrazy w przekroju poprzecznym przedstawiają kolejno zdrowy owoc (rys. 2a), owoc 24 godziny (rys. 2b) i 72 godziny (rys. 2c) po obtłuczeniu. Po lewej stronie rysunku pokazane zostały obrazy ważone gęstością protonową przedstawiające mapę rozkładu wody. Intensywniejszy sygnał na obrazie odpowiada tkance obfitszej w wodę. Widać wyraźnie, że kumulacja wody występuje w miejscu uderzenia. Prawa strona rysunku 2 przedstawia obrazy ważone czasem relaksacji T_2 . Obrazy te powstają, jeśli w skanowanej przestrzeni istnieje obszar charakteryzujący się krótszym czasem T_2 niż otoczenie, wówczas intensywność sygnału na obrazie dla tego obszaru jest mniejsza. Na uzyskanych obrazach ważonych czasem T_2 można zauważyć front postępującego brązowienia.

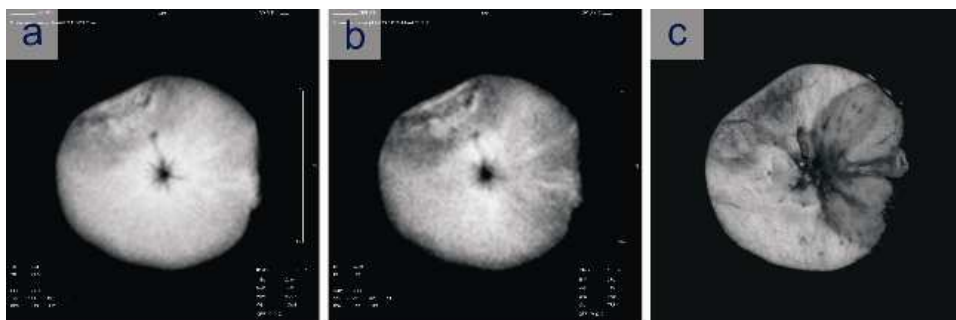
Na rysunku 3 dla porównania pokazane zostały obrazy w przekroju poprzecznym tej samej warstwy chorego jabłka wykonane tomografią MR (rys. 3a,b) oraz aparatem cyfrowym (rys. 3c). Zmiany mięszu jabłka, które wystąpiły w wyniku uderzenia (górną część obrazu), są zauważalne zarówno na obrazie ważonym gęstością protonową (rys. 3a), jak i czasem T_2 (rys. 3b), przy czym na drugim z wymienionych obserwujemy wyraźniejszy zasięg postępującego zbrązowienia. Przestrzenny rozwój choroby widoczny w owocu po prawej stronie fotografii został również rozpoznany na obrazie MR ważonym czasem relaksacji T_2 . Obszary zmian chorobowych (obszary ciemniejsze na obu rysunkach) bardzo dobrze korelują ze sobą. Zmiany te nie są natomiast widoczne na obrazach ważonych gęstością protonową.

Widzimy więc, że niskopolowy tomograf MR umożliwia rozpoznanie wewnętrznych chorób fizjologicznych, takich jak brązowienie, rozpad chłodniczy czy szklistość mięszu, związanych z przechowywaniem owoców. Należy jednak zastosować odpowiednie metody analizowania danych. Głównym ograniczeniem zaproponowanej metody detekcji (użycie sekwencji SE) jest zbyt długi czas akwizycji. Do zastosowań komercyjnych wymagane jest radykalne skrócenie czasu badania. Próbą rozwiązania tego problemu jest zastosowanie szybkich sekwencji obrazowania.

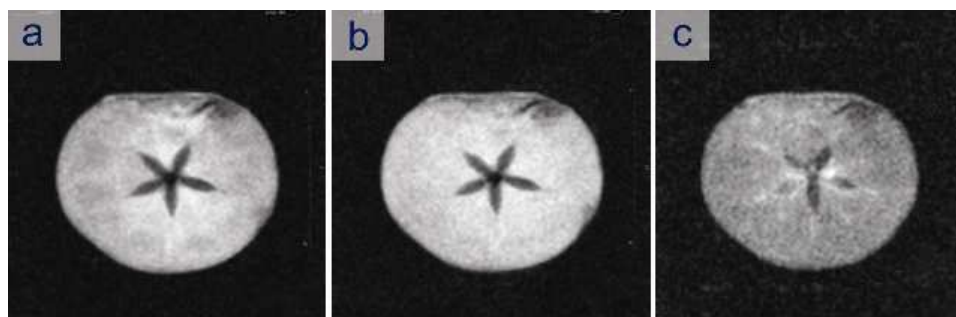
Na rysunku 4 przedstawione zostały obrazy MR w przekroju poprzecznym tego samego owocu uzyskane przy użyciu sekwencji: SE (rys. 4a), FSE (rys. 4b) i FLASH (rys. 4c). W przypadku obrazu uzyskanego techniką FSE czas akwizycji został skrócony czterokrotnie w stosunku do metody SE, jak widać bez istotnej straty jakości. Obraz wykonany z zastosowaniem metody FLASH został zebrany w czasie 90 s. W konsekwencji tak znacznego przyśpieszenia czasu akwizycji danych nastąpiło pogorszenie stosunku sygnału do szumu, jednak w dalszym ciągu uzyskany wynik daje podobny rozkład przestrzenny tkanki jak ten, uzyskany z zastosowaniem sekwencji SE.



Rys. 2. Obrazy w przekroju poprzecznym jabłka wykonane techniką SE, przed obtłuczeniem (a), 24h (b) i 72h (c) po obtłuczeniu. Po lewej stronie przedstawione zostały obrazy ważone gęstością protonową, po prawej czasem relaksacji T_2 .
Fig. 2. Transverse slices of apple obtained using SE sequence before fruit damage (a), 24h (b) and 72h (c) after damage. Proton density (left), and T_2 (right) weighted images



Rys. 3. Porównanie tomografii MR (a,b) i detekcji wizualnej (fotografia) (c) chorego jabłka. Obrazy MR ważone gęstością protonową (a) oraz czasem relaksacji T_2 (b) wykonane techniką SE.
Fig. 3. Comparison between MR images (a,b) and visual detection (photography) (c) of internal damage of apple. Proton density (a), and T_2 (b) weighted images obtained using SE sequence



Rys. 4. Obrazy w przekroju poprzecznym jabłka wykonane różnymi metodami: SE (a), FSE (b) i FLASH (c)

Fig. 4. Transverse slices of apple obtained using various sequences: SE (a), FSE (b) and FLASH (c)

Zaletą tomografii MR jest fakt, iż pomiary są niedestrukcyjne. Zatem niskopolowy tomograf może stać się kolejnym ciekawym narzędziem pozwalającym na obserwację rozwoju danej choroby w owocu. Tanie specjalnie dedykowane urządzenie z opracowaną systematyczną metodyką pomiarową ma szanse na zastosowania komercyjne.

WNIOSKI

1. Niskopolowy tomograf MR dostarcza podobnych informacji do uzyskiwanych konwencjonalną tomografią MR, a zatem może być z powodzeniem wykorzystany do oceny jakości owoców.

2. Wewnętrzne brązowienia jabłek, oraz różnego rodzaju chorobowe zmiany wewnątrz owocu były skutecznie badane opracowaną metodą niskopolowego obrazowania MR przy użyciu sekwencji SE.

3. W celu przyspieszenia czasu pomiaru zastosowano szybkie sekwencje impulsów FSE i FLASH, dla których uzyskano obrazy niosące informację analogiczną do skanów wykonanych techniką SE.

4. Uzyskane rezultaty są podstawą do przeprowadzenia systematycznych badań mających na celu wypracowanie konkretnych protokołów postępowania diagnostycznego dla zadanej choroby jabłek.

PIŚMIENNICTWO

Abbott J.A., 1999. Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 15, 207-225.

Barreiro P., Ruiz-Cabello J., Fernandez-Valle M.E., Ortiz C., Ruiz-Altisent M., 1999. Mealiness assessment in apples using MRI techniques. *Magnetic Resonance Imaging*, 17, 275-281.

- Clark C.J., Hockings P.D., Joyce D.C., Mazucco R.A., 1997. Application of magnetic resonance imaging to pre- and post-harvest studies of fruits and vegetables. *Postharvest Biology and Technology*, 11, 1-21.
- Clark C.J., MacFall J.S., Bielecki R.L., 1998. Loss of watercore from 'Fuji' apple observed by magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae*, 73, 213-227.
- Faust M., Wang P.C., Maas J., 1997. The use of magnetic resonance imaging in plant science. *Horticulture Review*, 20, 225-266.
- Haacke E.M., Brown R.W., Thomson M.R., Venkatesan R., 1999. *Magnetic Resonance Imaging: Physical Principles and Sequence Design*. John Wiley & Sons, Inc.
- Hennel J.W., 1999. *Wstęp do teorii magnetycznego rezonansu jądrowego*. wyd. II, Wydawnictwo Instytutu Fizyki Jądrowej w Krakowie.
- Kuczyński A., 2005. Studia nad dynamiką brązowienia i jej wykorzystaniem w ocenie świeżości miąższu jabłek. *Acta Agrophysica*, 138.
- Suchanek M., Cieślak K., Pałasz T., Suchanek K., Dohnalik T., Olejniczak Z., 2005. Magnetic Resonance Imaging at low magnetic field using hyperpolarized ^3He gas. *Acta Physica Polonica A*, 107, 491-506.
- Wang S.Y., Wang P.C., Faust M., 1988. Non-destructive detection of watercore in apple with nuclear magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae*, 35, 227-234.
- Wang S.Y., Wang P.C., 1989. Non-destructive detection of core breakdown in 'Bartlett' pears with nuclear magnetic resonance imaging. *HortScience*, 24, 106-109.
- Zion B., Chen P., McCarthy J., 1995. Detection of bruises in magnetic resonance images of apples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 13, 289-299.

QUALITY ASSESSMENT OF APPLES USING LOW FIELD MAGNETIC RESONANCE IMAGING

Mateusz Suchanek¹, Zbigniew Olejniczak^{2,3}

¹Department of Physics, Agricultural University, Al. Mickiewicza 21, 31-120 Kraków

²M. Smoluchowski Institute of Physics, Jagiellonian University, ul. Reymonta 4, 30-059 Kraków

³Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences

ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

e-mail: Mateusz.Suchanek@ar.krakow.pl

Abstract. In order to assess the quality of apples it is necessary to determine the structural changes in their tissues, related to changes of water distribution. Magnetic Resonance Imaging (MRI) is a nondestructive method for measurement of spatial distribution of water in biological material and its physical properties. Therefore, it can be used to detect mechanical damage and internal diseases of apples. The MRI experiments were carried out on a low field (0.088 T) system. The temporal evolution of the internal browning process in apples was studied by recording MRI images, using the spin echo (SE) sequence. By varying the echo time (TE) and repetition time (TR), proton density and T_2 weighted images were obtained and compared. In order to shorten the acquisition time, fast imaging sequences, like FSE and FLASH, were also used, which provided similar spatial information about the disease affected tissue of the fruit.

Key words: magnetic resonance imaging, MRI, apples, quality