



اساس تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) و مروری بر کاربردهای آن در کیفیت سنجی میوهها مهساسادات رضوی^۱، عبدالله گلمحمدی^۲، محمدطهماسبی^۳

^۱دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم؛ دانشگاه محقق اردبیلی؛ mahsarazavi.68@gmail.com

^۲دانشیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشگاه محقق اردبیلی؛ agolmohammadi42@gmail.com

^۳دانشجوی دکتری مکانیک بیوسیستم؛ دانشگاه محقق اردبیلی؛ m.tahmasebi@uma.ac.ir

چکیده

در این مطالعه به اساس روش تصویربرداری مغناطیسی (MRI) و کاربردهای آن در ارزیابی غیر مخرب میوهها پرداخته شده است. این تکنیک بر پایه تشدید مغناطیسی هسته اتمهای عناصری نظیر هیدروژن ۱ و فلورین ۱۹، سدیم ۲۳، فسفر ۳۱، نیتروژن ۱۵، که دارای پروتونهای جفت نشده هستند می باشد. ساده ترین عنصر که به طور گسترده سیستمهای MRI بر آن پایه گذاری می شود هسته هیدروژن (H: 1) است که دارای یک پروتون می باشد. دلیل آن فراوانی این عنصر در مولکول های آلی و حساسیت بالای آن ها به این روش (میدان مغناطیسی) است. از آن جایی که بین پارامترهای MR و شاخص های توصیف گر کیفیت میوه همبستگی وجود دارد، این روش قابلیت کیفیت سنجی میوهها به صورت غیرمخرب را دارا است. در این بررسی، پتانسیل روش های مبتنی بر MRI به منظور درجه بندی میوهها و محدودیت های روش MRI و نیز فناوری هایی که جهت غلبه بر این محدودیت ها توسعه یافته اند نیز بیان شده است.

کلمات کلیدی: MRI، غیر مخرب، کیفیت سنجی، میوه، تشدید مغناطیسی هسته

Basis of Magnetic Resonance Imaging (MRI) and a Review on Its Applications for Fruits Quality Evaluation

Mahsa S. Razavi^{*}, Abdollah Golmohammadi², Mohammad Tahmasebi³

¹PhD Student of Mechanical Engineering of Biosystem, University of Mohaghegh Ardabili;

Mahsarazavi.68@gmail.com

²Associated Professore at Engineering Department of Biosystem, University of Mohaghegh Ardabili;

agolmohammadi42@gmail.com

³PhD Student of Mechanical Engineering of Biosystem, University of Mohaghegh Ardabili;

m.tahmasebi@uma.ac.ir

ABSTRACT

In this paper, magnetic resonance imaging (MRI) basis and its applications in non-destructive evaluation of fruits quality are studied. This technique is based on nucleus magnetic resonance of atoms such as Hydrogen¹, Fluore¹⁹, Sodium²³, Phosphorus³¹, Nitrogen¹⁵ that have unpaired protons. The simplest element that is widely used for MRI systems is Hydrogen (H:1) and has one proton. Its abundance between organic molecules and high susceptibility to this method (magnetic field) caused to be selected for this technique. There are correlations between MR parameters and descriptive indices of fruits quality, so this technique has ability of non-destructive evaluation of fruits quality. In this study, potential of MRI-based methods to classification of fruits is expressed.

Keywords: MRI, Non-destructive, Quality evaluation, Fruit, Nucleus Magnetic Resonance



۱- مقدمه

پدیده تشدید مغناطیسی هسته در سال ۱۹۴۶ توسط فلیکس بلاک و ادوارد پرسل کشف شد. این روش تصویربرداری در سال‌های اخیر کاربردهای وسیع و مهمی در زمینه پزشکی داشته است و همچنین کاربردهای آن در زمینه کشاورزی و فناوری‌های پس از برداشت رو به افزایش است. از جمله ویژگی‌های ممتاز MRI در مقایسه با روش‌های تصویربرداری که از اشعه ایکس استفاده می‌کنند، تمایز فوق العاده نسوج نرم است. همچنین، در این روش اشعه از درون بدن یا بافت مورد نظر عبور نمی‌کند، بلکه امواجی با فرکانس رادیویی که به سوی نسوج ارسال شده اند، توسط پروتون‌های مغناطیسی منعکس شده و توسط سیم پیچ گیرنده دریافت می‌شود. این سیگنال دریافتی از بافت مورد نظر، توسط پروتون‌ها و در پاسخ به تحریک خارجی ایجاد می‌شود. ولتاژ سیگنال ایجاد شده متناسب با شدت خاصیت مغناطیسی پروتون‌های هر بافت می‌باشد (Blink, 2004).

نمونه مورد آزمایش می‌تواند انسان، حیوان آزمایشگاهی، ساقه گیاهان، میوه رسیده یا حتی محصولات گوناگون میوه باشد. برای مثال، یک محصول بسته بندی شده را می‌توان برای بررسی جابجایی یا کاهش محتوای آب داخلی آن با کمک این روش، طی چندین مرحله در طول زمان مورد تجزیه و تحلیل قرار داد زیرا تحلیل‌های انجام شده به روش MRI، محصول را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند.

روش‌های غیرمخرب بیشماری برای ارزیابی کیفی و درجه‌بندی محصولات کشاورزی و نیز میوه‌ها توسعه یافته‌است (Zion et al., 1995b; Abbott, 1999). تغییرات در ترکیب شیمیایی و ساختار بافت میوه در حال رشد و در طول دوره انبارداری ناشی از تغییرات در خصوصیات آب موجود در بافت ماده است. روش تشدید مغناطیسی هسته (NMR) به‌عنوان روشی برای توصیف خصوصیات فیزیکی آب در مواد بیولوژیکی شناخته شده‌است و تصویربرداری تشدید مغناطیسی (MRI) (تصویربرداری NMR) مزایای ویژه‌ای نسبت به دیگر تکنیک‌های غیرمخرب دارد که می‌تواند تغییرات بافت داخلی میوه‌های سالم را در طول کل دوره نگهداری تعیین و توزیع بافت‌های آسیب‌دیده را با وضوح بالا توصیف کند (Clark et al., 1998). اعتبار کاربرد MRI در عیب‌یابی پزشکی (Brant et al., 2012)، علوم گیاهی (Faust et al., 2010) و علوم غذایی (Schmit et al., 1996; Farhat et al., 2007) گواه پتانسیل آن برای کاربردهای اینچنینی است. برخی چالش‌های اولیه کاربرد فناوری‌های MR برای کاربردهای تجاری و صنعتی ارزیابی کیفی مواد غذایی هزینه بالا، اندازه و وزن زیاد آهنرباها، تداخل بین میدان‌های الکترومغناطیسی خارجی، نیازمند توان خروجی بالا و حساسیت به ارتعاشات مکانیکی می‌باشند. ترکیبات مولکولی میوه‌ها حاوی هسته‌های فعال MR هستند و این هسته‌ها می‌توانند به‌عنوان حسگرهای ساختار و بافت داخلی، مزه و دیگر فاکتورهای بیان‌کننده کیفیت میوه باشند (Colnago et al., 2014).

۲- تصویربرداری به روش تشدید مغناطیسی هسته

اساس MRI

MRI از NMR، تشدید مغناطیسی هسته، مشتق شده است. در سطح میکروسکوپی، الکترون‌های اتم در حرکت چرخشی خود که اسپین نامیده می‌شود، مانند حلقه‌های کوچک حاوی جریان الکتریکی عمل می‌کنند. جریان الکتریکی (حرکت ذرات باردار)، باعث ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف آن ذره می‌شود. در اکثر بافت‌ها، الکترون‌ها در حالت زوج شده با سایر الکترون‌های همان اتم یا اتم‌های مجاور هستند، از این رو دارای بردار برآیند مغناطیسی صفر بوده و لذا الکترون‌ها در تشکیل تصویر MRI نقشی ندارند. پروتون‌ها نیز به دلیل باردار بودن و حرکت اسپینی (چرخش حول محور خود)، دارای خاصیت مغناطیسی هستند. هسته بعضی عناصر نظیر هیدروژن ۱ و فلوروتر ۱۹، سدیم ۲۳، فسفر ۳۱، نیتروژن ۱۵، که دارای پروتون‌های جفت نشده هستند نیز، دارای خاصیت مغناطیسی می‌باشند. ساده‌ترین عنصر، هسته هیدروژن (H: ۱) است که دارای یک پروتون می‌باشد. برای تصویربرداری MRI، هسته‌های هیدروژن (پروتون) بیش‌ترین سیستم اسپین را دارند و عمده خاصیت مغناطیسی از همین پروتون‌ها نشأت می‌گیرد. دلیل انتخاب این عنصر: ۱- فراوانی آن در مولکول‌های آلی ۲- حساسیت بالای آن‌ها به این روش (میدان مغناطیسی) است. از آنجایی که یک بار الکتریکی در حال حرکت (یعنی جریان)، میدان مغناطیسی ایجاد می‌کند، یک هسته هیدروژن به تنهایی (یک پروتون یا بار مثبت) نیز مشابه یک آهنربای خیلی کوچک است. این آهنربای میکروسکوپی، "دوقطبی مغناطیسی هسته" یا "گشتاور مغناطیسی" نامیده می‌شود. وقتی دو قطبی مغناطیسی هسته‌ای تحت یک میدان مغناطیسی خارجی قوی قرار می‌گیرد، نیروی چرخاننده‌ای به نام گشتاور به آن وارد می‌شود. این شبیه یک میله قطب‌نما است که تحت تأثیر میدان مغناطیسی زمین نیرویی به آن وارد می‌شود و می‌چرخد به طوری که در جهت میدان قرار گیرد. بعد از قرار گرفتن پروتون در این میدان، دو اتفاق رخ می‌دهد:

۱- دو قطبی تحت یک زاویه (تقریباً ۵۵) درجه با جهت میدان اعمال شده هم راستا می‌شود.

۲- دو قطبی تحت یک زاویه (تقریباً ۵۵) به صورت فرفرهای پیرامون جهت میدان اعمال شده می‌چرخد.

به این حرکت فرفرهای مانند حول محور میدان اصلی، حرکت تقدیمی گفته می‌شود و سرعت آن با واحد هرتز (Hz) اندازه‌گیری می‌شود و



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



فرکانس لارمور پروتون نامیده می‌شود. چون گشتاور مغناطیسی با میدان خارجی یک زاویه می‌سازد، نوک بردار، دایره‌ای را حول میدان رسم می‌کند (شکل ۱) (Schild, 1990; Blink, 2004).

فرکانس حرکت تقدیمی به دو عامل بستگی دارد:

$$\omega_0 = \gamma B_0 \quad (1)$$

(۱) B_0 ، شدت میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده (برحسب تسلا)

(۲) γ ، ثابتی به نام نسبت ژیرومگنتیک (ژیرومگناطیس) (MHz/T)، ارتباط میان ω_0 ، B_0 و خطی ساده است (استفاده از اندیس صفر به منظور

نشان دادن فرکانس لارمور و میدان مغناطیسی خارجی است).

بعد از قرار گرفتن در میدان مغناطیسی ثابت، یک دوقطبی مغناطیسی هسته‌ای منفرد، می‌تواند یکی از تعداد جهت‌گیری‌های ممکن با میدان مغناطیسی ثابت را برگزیند. در شرایط فیزیک کوانتوم این جهت‌گیری‌ها مرتبط با "وضعیت‌های اسپین" است. تعداد جهت‌گیری‌ها به وسیله عدد کوانتومی اسپین (I) هسته‌ها تعیین می‌شود و برابر $2I+1$ است. برای پروتون‌ها عدد کوانتوم اسپین $1/2$ می‌باشد، بنابراین فقط دو حالت جهت‌گیری ممکن در میدان برای پروتون‌ها وجود دارد. جهت‌گیری‌های مختلف، مرتبط با سطوح انرژی مختلف ممکن برای "وضعیت‌های اسپین" است. وضعیت‌های ممکن اسپین برای یک پروتون در یک میدان مغناطیسی ثابت، "موازی" یا "پاد موازی" هستند. در حالت موازی، دوقطبی تحت زاویه تقریباً 55° درجه حول جهت میدان اعمال شده حرکت تقدیمی می‌کند. در حالت پاد موازی، دوقطبی تحت زاویه تقریباً 55° درجه حول جهت میدان اعمال شده و در خلاف جهت آن حرکت تقدیمی دارد. حالت موازی حالت اسپین بالا یا حالت انرژی پایین و حالت پاد موازی نیز، حالت اسپین پایین یا حالت انرژی بالا نامیده می‌شود (شکل ۲). جهت پاد موازی اندکی بیشتر از جهت موازی نیاز دارد و هر دو حالت پایدار می‌باشند و پروتون‌ها با به دست آوردن یا از دست دادن مقدار معینی انرژی می‌توانند به راحتی بین دو حالت تغییر وضعیت دهند (Schild, 1990; Blink, 2004; Clare, 1997).

در بیشتر اتم‌ها آرایش‌های الکترونی بسیاری هستند که انرژی یکسانی دارند (بدلیل قرار گرفتن در لایه‌های الکترونی یکسان). ولی در حضور یک میدان مغناطیسی، الکترون‌هایی که اعداد کوانتومی متفاوت دارند (در زیرلایه‌های فرعی متفاوتی قرار گرفته‌اند) از میدان مغناطیسی به شکل‌های متفاوتی اثر می‌پذیرند. از این‌رو، هنگامی که اتم‌ها داخل میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، سطوح انرژی اتم به چندین سطح انرژی مجزا تقسیم می‌شوند و این باعث می‌شود خطوط طیفی تازه‌ای بوجود آید که البته بسیار به هم نزدیک هستند. در فیزیک به این پدیده، شکافتگی خطوط طیفی اتم‌ها در حضور میدان مغناطیسی، اثر زیمان گفته می‌شود. هسته‌ها نیز، این خصوصیت مغناطیسی را از خود نشان می‌دهند. از این‌رو، هنگامی که هسته‌ها داخل میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، سطوح انرژی آن‌ها به چندین سطح انرژی مجزا اما نزدیک به هم تقسیم می‌شوند (شکل ۳). پروتون‌ها بین این دو حالت از یک توزیع آماری پیروی می‌کنند و حالت انرژی پایین‌تر کمی بیشتر از حالت انرژی بالا ترجیح داده می‌شود، به طوری که پروتون‌های بیشتری در حالت موازی نسبت به پاد موازی قرار دارند (برای هر یک میلیون پروتون در جهت اسپین-پایین، یک میلیون و سه پروتون یا یک میلیون و چهار پروتون در جهت اسپین بالا وجود دارد)، که به این پدیده بی‌اعتدالی اسپین گفته می‌شود (Schild, 1990; Douglas, 1998; Clare, 1997).

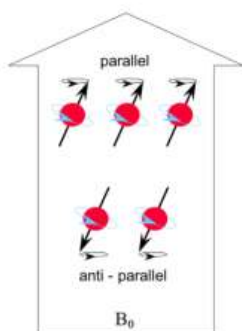


Figure 2. Two possible orientations for protons in the external magnetic field

شکل ۲- دو جهت‌گیری ممکن برای پروتون‌ها در میدان مغناطیسی خارجی

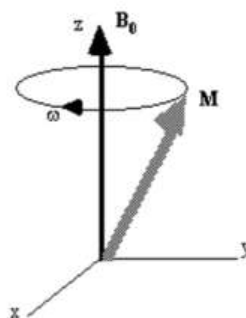


Figure 1. Move forward magnetic moment
شکل ۱- حرکت تقدیمی گشتاور مغناطیسی

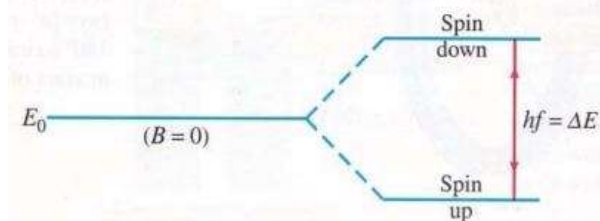


Figure 3. Two energy levels for protons
شکل ۳- دو سطح انرژی برای پروتون‌ها

اختلاف انرژی بین این دو حالت (اسپین پایین و اسپین بالا برای پروتون) را با $\Delta\varepsilon$ نشان می‌دهند و برابر است با:

$$\Delta\varepsilon = \hbar\omega \quad (2)$$

ω فرکانس لارمور پروتون‌ها و \hbar ثابت پلانک است که بر 2π تقسیم شده است. طبق فرمولی که از قبل برای فرکانس لارمور داشتیم، نتیجه گرفته می‌شود که این اختلاف انرژی با شدت میدان مغناطیسی اعمالی نسبت مستقیم دارد. برای بررسی میکروسکوپی پروتون‌ها در میدان مغناطیسی که هر یک دارای بردار مغناطیسی می‌باشند، چون تعداد بسیار زیادی پروتون در یک توده وجود دارد، می‌توان هر بردار را نماینده گشتاور مغناطیسی متوسط گروه بزرگی از پروتون‌ها تصور کرد که همگی فرکانس یکسانی دارند و بردار برآیند حاصل از آن‌ها را M می‌نامند. گشتاور دوقطبی هسته‌ها می‌توانند به دو مؤلفه تقسیم شوند یک مؤلفه‌ای که در جهت میدان مغناطیسی اعمال شده می‌باشد و مؤلفه طولی نامیده می‌شود و دیگری، تحت زاویه قائم نسبت به مؤلفه طولی، که مؤلفه عرضی نامیده می‌شود. مؤلفه طولی ثابت است و هم‌جهت با میدان مغناطیسی اعمال شده می‌باشد. مؤلفه عرضی ثابت نیست، اما با فرکانس لارمور حول محور میدان در حال چرخش است. پروتون‌ها همه با هم غیر هم فاز هستند. در نتیجه، مؤلفه‌های عرضی دوقطبی‌های مغناطیسی هسته همگی خارج از گام یا "خارج از فاز" می‌چرخند. به طور میانگین، برای هر پروتون یک پروتون مرتبط وجود دارد که با 180° درجه اختلاف فاز نسبت به آن در حال چرخش است. در نتیجه در شبکه‌ای از اسپین‌ها، هر دو پروتون در این وضعیت یک مؤلفه عرضی صفر را حاصل می‌کنند. بنابراین، در میدان ثابت هیچ مؤلفه عرضی برای مغناطیس توده (M) وجود ندارد. پروتون‌های اسپین پایین، مؤلفه‌های طولی عکس جهت میدان اعمال شده دارند. در یک توده که شامل میلیون‌ها پروتون است، هر پروتون اسپین بالا، اثر یک پروتون اسپین پایین را خنثی می‌کند. اما به دلیل اینکه تعداد پروتون‌های اسپین بالا تعداد کمی بیشتر از پروتون‌های اسپین پایین می‌باشد، بردار برآیند مغناطیسی توده (M) مؤلفه‌ای طولی هم جهت با میدان اعمال شده B_0 (که به طور قراردادی در جهت Z نشان داده می‌شود) دارد. این مؤلفه شبکه در میدان ثابت معمولاً M_0 نامیده می‌شود (شکل ۴) (Schild, 1990; Douglas, 1998).

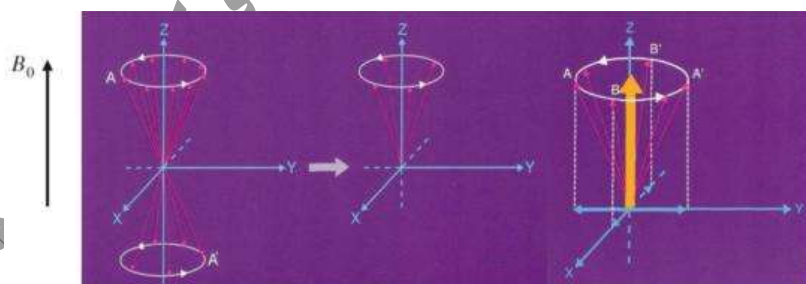


Figure 4. Resultant vector in direction of the field
شکل ۴- بردار برآیند حاصل در جهت میدان

ارسال کننده‌ها و دریافت کننده‌های امواج رادیویی (RF)

برای شناسایی پروتون‌های داخل بافت‌ها، نیاز است تا سیگنالی از آن‌ها دریافت شود. برای این منظور، بردار برآیند مغناطیسی باید مؤلفه‌ای عرضی داشته باشد، که بدلیل حرکت چرخشی آن، سیگنالی را تولید کند تا قابل شناسایی شود. برای این منظور، از ارسال کننده‌های امواج رادیویی استفاده می‌شود تا پالسی با بسامدی رادیویی که دامنه، بسامد و مدت زمان آن مناسب این فرآیند است، اعمال شود تا بردار مغناطیس توده را تحت زاویه‌ای نسبت به جهت میدان ثابت بچرخاند. در حقیقت سیم‌پیچ ارسال کننده RF، میدانی زاویه‌دار نسبت به میدان اصلی ایجاد می‌کند که موجب زاویه‌دار شدن بردار برآیند مغناطیسی پروتون‌ها نسبت به راستای میدان مغناطیسی می‌شود. در نتیجه بردار M_0 یک مؤلفه عرضی نیز خواهد داشت. این مؤلفه توسط سیم‌پیچ RF دریافت کننده قابل شناسایی است و اساس سیگنال MR را شکل می‌دهد. زوایایی که عموماً به کار می‌رود 90° و 180°



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



انجمن مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



Buali Sina University

درجه می‌باشد (Schild, 1990; Blink, 2004).

امواج رادیویی حامل بسته های انرژی از جنس فوتون هستند. انرژی هر فوتون متناسب با فرکانس آن و برابر است با:

$$E = \hbar \cdot f \quad (3)$$

\hbar ثابت پلانک است که بر 2π تقسیم شده است و f فرکانس هر فوتون می‌باشد. فقط فوتون‌هایی با انرژی $\Delta\varepsilon$ می‌توانند پروتون را از وضعیت

انرژی پایین به انرژی بالا برانگیخته کنند. به عمل برانگیختگی نیز تشدید می‌گویند. انرژی یک فوتون که موجب تشدید می‌شود برابر است با:

$$hf_{Larmor} = hf_{Photon} \quad (4)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$f_{Larmor} = f_{Photon} \quad (5)$$

فقط فوتون‌هایی قابلیت برانگیخته کردن پروتون‌ها را دارند که فرکانس آن‌ها برابر با فرکانس لارمور پروتون‌ها باشد. این تشدید و انتقال انرژی

سبب دو اتفاق می‌شود:

۱- پروتون‌ها به سطح انرژی بالا می‌روند که در نتیجه آن تعداد پروتون‌ها در دو سطح انرژی باهم برابر شده و مؤلفه طولی بردار مغناطیسی صفر

می‌شود.

۲- پروتون‌ها باهم هم فاز می‌شوند که نتیجه آن تولید مؤلفه عرضی در بردار برآیند مغناطیسی است (شکل ۵) (Schild, 1990).



Figure 5. (a) Before applying the RF pulse. (b) Neutralization of longitudinal component and appearance of transverse component after applying the 90° RF pulse

شکل ۵- (الف) قبل از اعمال پالس RF. (ب) خنثی شدن مؤلفه طولی و پدیدار شدن مؤلفه عرضی پس از اعمال پالس 90° RF درجه.

به سرعت بعد از قطع پالس (RF)، دو اتفاق برای پروتون‌ها رخ می‌دهد (شکل ۶):

۱- پروتون‌ها به تراز انرژی پایین‌تر باز می‌گردند.

۲- پروتون‌ها نسبت به هم غیر هم فاز می‌شوند.

در نتیجه از دست دادن انرژی جذب شده از پالس، پروتون‌ها سریعاً به حالت اولیه و پایدار خود باز می‌گردند. به همین دلیل بردار برآیند

مغناطیسی توده طی حرکتی حلزونی شکل به دور محور میدان اصلی که دامنه آن به تدریج کم می‌شود، به حالت قبل از اعمال پالس باز می‌گردد

(شکل ۷). طی این فرآیند، از آنجایی که دامنه بردار M در حال کاهش است، در نتیجه میدان مغناطیسی متغیری نسبت به زمان ایجاد می‌کند که

سبب القای جریانی متغیر در سیم پیچ های RF گیرنده سیگنال می‌شود. سیم‌پیچ‌های RF گیرنده، تغییرات جریان را برای رقومی سازی و پردازش

آن‌ها توسط کامپیوتر، به تغییرات ولتاژ نسبت به زمان تبدیل می‌کنند. سیگنال دریافت شده بوسیله سیم‌پیچ RF دریافت کننده، به صورت سینوسی

رو به زوال می‌رود. این زوال به دلیل این است که دامنه مؤلفه عرضی بردار مغناطیسی در حال کاهش است. دلیل سینوسی بودن موج آن است که

مؤلفه عرضی بردار مغناطیسی در حال چرخش حول محور میدان است. چون پروتون‌ها به سرعت نسبت به هم دفاز می‌شوند، این سیگنال را زوال

القای آزاد (FID) می‌گویند (شکل ۸). در تصویربرداری MR هیچ‌گاه این سیگنال را مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌کنند، بلکه اکوهای تولید می‌کنند

که آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهند. (Schild, 1990; Blink, 2004; 1998; Clare, 1997).

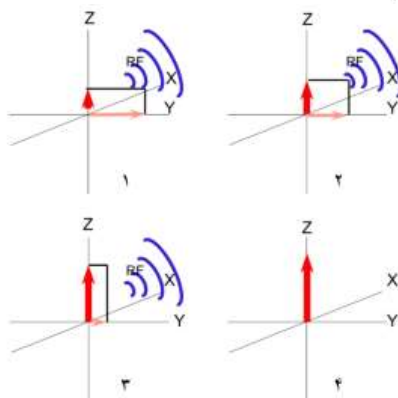


Figure 6. After the RF excitation pulse stops
شکل ۶- بعد از قطع پالس RF

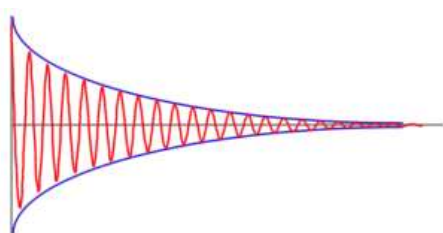


Figure 8. FID Signal
شکل ۸- سیگنال FID

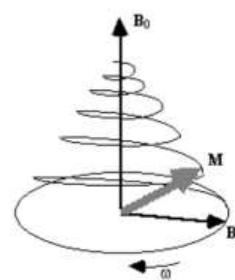


Figure 7. Oscillating rotation of magnetic vector
شکل ۷- چرخش حلزونی بردار مغناطیسی توده

توالی پالس

پالس های RF باید بیش از چند صد بار اعمال شوند تا اطلاعات کافی برای تشکیل یک تصویر MR بدست آید. هنگامی که پالس های RF با فواصل زمانی مشخص، چندین بار اعمال می شوند، توالی پالس را بوجود می آورند. رایج ترین توالی پالس، اسپین اکو (SE) می باشد. توالی پالس اسپین اکو به این صورت است که ابتدا یک پالس RF ۹۰ درجه و به دنبال آن یک پالس RF ۱۸۰ درجه اعمال می شود. تأخیر زمانی بین پالس ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه برابر با $TE/2$ است (پالس ۱۸۰ درجه در زمان $TE/2$ اعمال می شود) که TE زمان اکو نامیده می شود (شکل ۹) (Boyle, 2006).

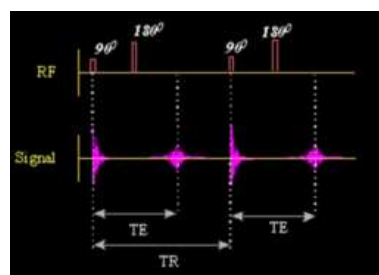
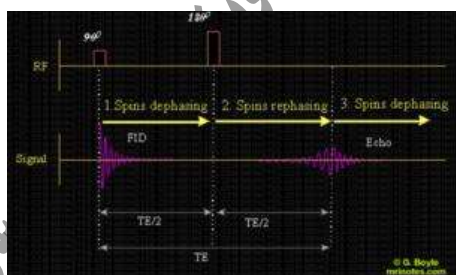


Figure 9. Spin Echo Pulse Sequence

شکل ۹- توالی پالس اسپین اکو

بعد از اعمال پالس ۹۰ درجه، بردار مغناطیس توده M به صورت حلزونی به صفحه عرضی متمایل می شود. بلافاصله بعد از اعمال این پالس، مؤلفه طولی بردار مغناطیسی (Mz) برابر صفر می شود و مؤلفه عرضی آن در صفحه xy (Mxy) برابر M0 می شود. پس از قطع پالس RF و در فاصله زمانی بسیار کوتاه (چند میلی ثانیه) تا اعمال پالس ۱۸۰ درجه، پروتون ها شروع به غیر هم فاز شدن می کنند و از این رو دامنه سیگنال دریافتی به سمت صفر میل می کند. پس از آن با اعمال پالس ۱۸۰ درجه در زمان $TE/2$ بعد از پالس ۹۰ درجه که اسپین ها غیر هم فاز شده اند، تمامی اسپین ها در صفحه عرضی به اندازه ۱۸۰ درجه حول محور می چرخند و بعد از آن اسپین ها دوباره شروع به هم فاز شدن می کنند و بردار مغناطیس توده M به صورت حلزونی به جهت مقابل متمایل می شود (شکل ۱۰). از زمان شروع سیگنال FID (نقطه اوج سیگنال دریافتی که شروع غیر هم فاز شدن



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



اسپین‌ها است)، تا زمان اوج سیگنال اکو دریافتی (در نقطه ای که بعد از اعمال پالس ۱۸۰ درجه، اسپین‌ها دوباره هم فاز شده اند) را TE می‌گویند و به فاصله زمانی بین دو پالس ۹۰ درجه زمان تکرار (TR) می‌گویند (Boyle, 2005; Schild, 1990; Blink, 2004). همانطور که گفته شد، پالس RF به طور متوسط پروتون‌ها را از حالت انرژی پایین به حالت انرژی بالا ارتقاء می‌دهد که سبب جذب خالص انرژی می‌شود. اسپین‌ها می‌توانند به شبکه محیط اطراف انرژی منتقل کنند، که به آن‌ها اجازه می‌دهد به آسایش تعادلی برگردند. به زمان لازم برای از دست دادن این انرژی اضافی از سیستم اسپین به محیط اطراف، یا شبکه، زمان آسایش اسپین-شبکه یا T_1 می‌گویند (شکل ۱۱). اگر چه حالت انرژی بالا یک وضعیت پایدار برای پروتون است و به طور خود به خود به حالت انرژی پایین‌تر بر نمی‌گردد، اما برای این منظور به یک میدان خارجی محرک نیاز دارد. این میدان از پروتون‌های مجاور یا هسته‌ها یا مولکول‌های دیگر حاصل می‌شود، که دارای گشتاورهای مغناطیسی هستند. برای مثال در آب، نزدیک‌ترین هسته‌های مجاور، اتم هیدروژن دیگر در همان مولکول هستند. بنابراین، آسایش ابتدا ناشی از گشتاور مغناطیسی یک میدان مغناطیسی با دو قطب است. علاوه بر این، زمان T_1 نیز به شدت میدان مغناطیسی اصلی بستگی دارد و هرچه شدت آن بیشتر باشد زمان آسایش T_1 افزایش می‌یابد. T_1 مدت زمانی است که طول می‌کشد تا بردار مغناطیسی طولی (M_z) به ۶۳٪ مقدار تعادلی خود (M_0) بازگردد و این روند به صورت نمایی انجام می‌شود.

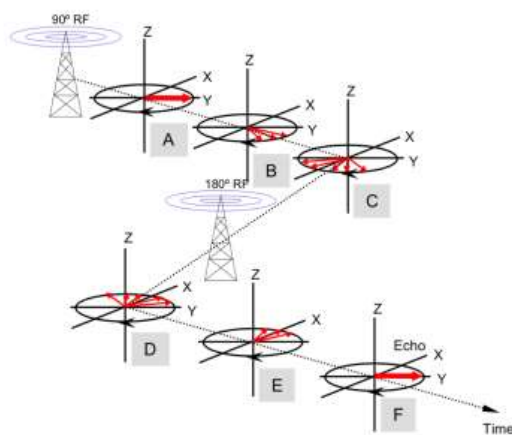


Figure 10. (a) Phasing after 90° pulse. (b) Dephasing. (c) Dephasing increases then 180° pulse is applied. (d) Reversing around Y axis then repahsing. (e) Spins rephasing. (f) Echo formation

شکل ۱۰- (a) همفاز شدن بعد از پالس ۹۰ درجه. (b) غیر همفاز شدن. (c) غیر همفاز شدن بیشتر شده و سپس اعمال پالس ۱۸۰ درجه. (d) معکوس شدن حول محور Y و همفاز شدن. (e) همفاز شدن اسپین‌ها. (f) تشکیل یک اکو.

از طرفی، بعد از هم فاز شدن پروتون‌ها، اگر دو پروتون به یکدیگر نزدیک شوند، هر کدام از آن‌ها یک میدان مغناطیسی اندکی بالاتر یا پایین‌تر را تجربه می‌کنند، چون گشتاور مغناطیسی پروتون دیگر، به میدان اصلی اضافه یا از آن کم می‌شود. فرکانس لارمور آن‌ها بلافاصله تغییر می‌کند تا با میدان جدید هماهنگ شود، و هر پروتون نسبت به فرکانس لارمور غیر همفاز می‌شود. هنگامی که مجدداً از هم دور شوند هر دو به فرکانس لارمور بر می‌گردند، اما زوایای فازی که آن‌ها در طی این برهم کنش بدست آورده بودند غیر قابل بازگشت است. چون بعد از مدتی هر پروتون با هزاران پروتون دیگر برهم کنش خواهد کرد، و اختلاف زوایای فاز بزرگتر و بزرگتر می‌شود تا اینکه همه پروتون‌ها با یکدیگر ناهم فاز شوند. طی فرآیند غیر همفاز شدن پروتون‌ها، مؤلفه عرضی بردار مغناطیسی کاهش یافته و چون برهم کنش بین پروتون‌ها کتره‌ای است، مؤلفه عرضی بردار مغناطیسی به طور نمایی به سمت صفر کاهش می‌یابد. و در نهایت به صفر می‌رسد. مدت زمانی را که طول می‌کشد تا مؤلفه عرضی بردار مغناطیسی به ۳۷٪ مقدار اولیه کاهش یابد را زمان آسایش اسپین-اسپین یا T_2 می‌گویند (شکل ۱۱). T_2 کاملاً مستقل از شدت میدان مغناطیسی B_0 می‌باشد (McRobbie et al, 2006; Blink, 2004).

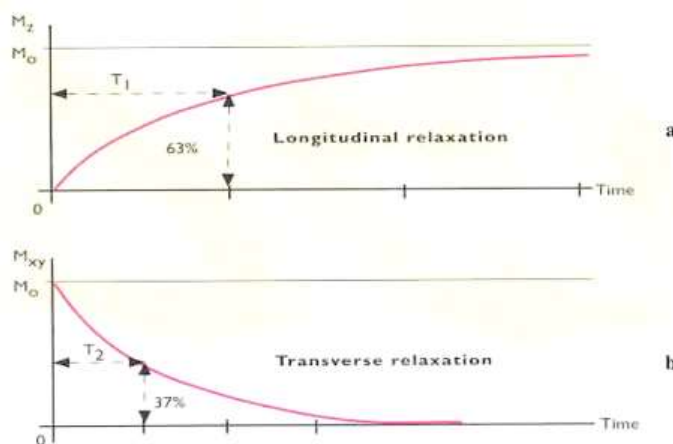


Figure 11. (a) Longitudinal relaxation or spin-net. (b) Transverse relaxation or spin-spin.

شکل ۱۱- (a) آسایش طولی یا اسپین-شبکه. (b) آسایش عرضی یا اسپین-اسپین.

انواع تصاویر رایج در MRI

معمولاً سه نوع تصویر در MRI تهیه می‌شوند:

تصاویر با وزن T_1 ($T_1.W$): تصاویری که در آن‌ها تمایز بین بافت‌ها عمدتاً ناشی از اختلاف T_1 بافت باشد.

تصاویر با وزن T_2 ($T_2.W$): تصاویری که تمایز بین بافت‌ها در آن‌ها بیشتر ناشی از اختلاف T_2 بافت‌ها می‌باشد.

تصاویر با وزن دانسیته پروتونی ($PD.W$): تصاویری که در آن‌ها ایجاد تمایز بین بافت‌ها عمدتاً بعلاوه اختلاف چگالی پروتون‌ها است. در این

تصاویر، بافت‌هایی که تراکم پروتون‌ها در واحد حجم بیشتر باشد، روشن‌تر از بافت‌هایی با تراکم پروتون کم‌تر نشان داده می‌شود. تعیین نوع تصویر بوسیله پارامترهای TE و TR تعیین می‌شود.

تصاویر وزنی T_1

زمان استراحت T_1 بافت‌ها، میزان احیاء بردار مغناطیسی طولی آن بافت را بعد از اعمال پالس و نیز تمایز نسوج را تعیین می‌کند. برای دو بافت مختلف که اختلاف T_1 آن‌ها زیاد است، اگر TR زیاد در نظر گرفته شود، بردار مغناطیسی طولی هر دو بافت فرصت کافی برای احیای دوباره را خواهند داشت، از این رو اختلاف اندازه میان این دو بردار و در نتیجه اختلاف سیگنال دریافتی از این دو بافت کمتر بوده و تمایز آن‌ها در تصویر کمتر خواهد شد. چون بردار طولی مغناطیسی یک بافت سریع‌تر از بافت دیگر احیا می‌شود، اگر TR کم در نظر گرفته شود، اندازه بردار این دو بافت کاملاً متفاوت بوده و در نتیجه اختلاف سیگنال دریافتی از این دو بافت زیاد خواهد بود و تمایز آن‌ها در تصویر بالا می‌رود. پس اساس ایجاد تصاویر T_1 استفاده از TR کوتاه است. هم‌چنین برای تشکیل این تصاویر، برای آن که از وزن T_2 کاسته شود و تصاویر T_2 کمتر تحت تأثیر زمان استراحت T_2 باشند، از TE کوتاه استفاده می‌شود (Clare, 1997; Blink, 2004).

تصاویر وزنی T_2

زمان استراحت T_2 بافت‌ها، میزان غیر هم فاز شدن بردارهای عرضی مغناطیسی پس از اعمال پالس و نیز تمایز بافت را تعیین می‌کند. برای دو بافت مختلف که اختلاف زمانی T_2 آن‌ها زیاد است، اگر TE کم در نظر گرفته شود، مؤلفه عرضی بردار مغناطیسی بلافاصله بعد از قطع پالس حداکثر بوده و برای هر دو بافت تقریباً یکسان است، از این رو اختلاف اندازه میان این دو بردار و در نتیجه اختلاف سیگنال دریافتی از این دو بافت کمتر بوده و تمایز آن‌ها در تصویر کمتر خواهد شد. چون مؤلفه عرضی بردار مغناطیسی یک بافت سریع‌تر از بافت دیگر رو به زوال می‌رود، با گذشت زمان اختلاف اندازه میان دو مؤلفه عرضی مغناطیسی دو بافت زیاد می‌شود، در نتیجه اگر TE زیاد در نظر گرفته شود، اختلاف سیگنال دریافتی از دو بافت بیشتر خواهد شد و تمایز در بافت در تصویر افزایش می‌یابد. پس اساس ایجاد تصاویر T_2 استفاده از TE بلند می‌باشد. هم‌چنین برای تشکیل این تصاویر، برای آن که از وزن T_1 کاسته شود و تصاویر T_2 کمتر تحت تأثیر زمان استراحت T_1 باشند، از TR بلند استفاده می‌شود (Clare, 1997; Blink, 2004).



تصاویر با وزن دانسیته پروتون

برای ساخت تصاویر بر اساس دانسیته پروتونی، برای آن که زمان‌های استراحت T_1 و T_2 در ایجاد تمایز بافتی نقش کمتری داشته باشند و تصویر ایجاد شده فقط بر اساس دانسیته پروتون‌ها در واحد حجم باشد، از TR بلند جهت کاهش نقش T_1 و از TE کوتاه جهت کاهش نقش T_2 در ایجاد تمایز بافتی استفاده می‌شود (Clare, 1997; Blink, 2004).

۳- کاربردهای تشدید مغناطیسی هسته برای ارزیابی کیفیت میوه‌ها

سیستم‌های تصویربرداری تشدید مغناطیسی پتانسیل آن را دارند که برای تغییرات فیزیولوژیکی میوه‌ها قبل و پس از برداشت به کار گرفته شوند. همچنین، MRI نیز می‌تواند برای بررسی ناهنجاری‌های میوه در طول دوره پس از برداشت استفاده شود (Clark et al., 1999; Clark and MacFall, 2003). MRI برای شناسایی مورفولوژی، ازهم پاشیدگی هسته، دانه‌ها و حفرات، فضاهای خالی، حمله عوامل بیماری‌زا، آسیب‌های گرم‌خوردگی، کوفتگی، نواحی خشک‌شده، تغییرات ناشی از رسیدگی، حرارت، سرمازدگی و بیخ زدگی (Abbott et al., 1997; Barreiro et al., 2000; Brummell, 2006) به کار گرفته شده است. همبستگی بین پارامترهای MR و شاخص‌های توصیف‌گر کیفیت میوه از جمله سفتی، ماده خشک، محتوی جامد محلول، اسیدیته کل و عدد بریکس مشاهده شده است (Chen et al., 1991). MRI پتانسیل ارزیابی غیرمخرب و غیرتهاجمی مرحله رسیدگی، تخمین طول عمر و زمان بهینه مصرف را دارد. برخی مطالعات MRI مربوط به بررسی‌ها غیرمخرب کیفیت میوه، در این‌جا مرور شده است.

هسته آبکی یک ناهنجاری فیزیولوژیکی است که کیفیت میوه سیب را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ناشی از پر شدن فضاهای بین‌سلولی با مایع است. زوال میوه سیب رقم "فوجی" بعد از برداشت به دلیل هسته آبکی با استفاده از MRI بررسی شد (Clark, 1998a, b). آسیب‌های داخلی میوه را می‌توان یا کمک شناسایی حفرات که با افزایش سطح CO_2 و کاهش O_2 در طول دوره نگهداری ایجاد شده‌اند، شناسایی کرد (Clark et al., 1999). MRI برای بررسی توزیع هسته آبکی درون میوه سیب استفاده شد و شیوع آن مرتبط با اثر تابش خورشیدی درون تاج‌پوشش گیاهی یافت شد. مقدار ترکیبات قند، با فروکتوز بالا و محتوی قند کل در میوه‌های سیب در بالای تاج‌پوشش به‌طور قابل ملاحظه‌ای با نمونه‌های پایین تاج‌پوشش تفاوت داشت. مقدار سوربیتول بیشتر و ساکاروز و فروکتوز کمتری در بافت آسیب‌دیده هسته آبکی در مقایسه با بافت سالم سیب آسیب‌دیده و سیب‌های سالم یافت شد (Melado-Herrerros et al., 2013). MRI برای شناسایی قهوه‌ای شدن میوه سیب در طول دوره انبارداری استفاده شد (Gonzalez et al., 2001). قهوه‌ای شدن داخلی یک ناهنجاری فیزیولوژیکی است که در طول دوره نگهداری سیب با اتمسفر کنترل شده رخ می‌دهد. این ناهنجاری را در تصاویر MRI می‌توان براساس اختلافات در چگالی پروتون، T_2 و ضریب نفوذ شناسایی کرد. ضریب نفوذ به‌عنوان مناسب‌ترین پارامتر برای شناسایی قهوه‌ای شدن بافت داخلی شناسایی شد (Defraeye et al., 2013). MRI را می‌توان برای تعیین تغییرات در بافت داخلی میوه‌های سالم در طول دوره رشد به کار گرفت (Faust et al., 2010). مقادیر T_2 می‌توانند برای نظارت بر مرحله بیولوژیکی بافت‌ها استفاده شوند و مرتبط با نسبت آب محدودشده و آب آزاد است (Marigheto et al., 2008). مشاهده شد که چگالی پروتون با افزایش زمان نگهداری طولانی‌تر افزایش می‌یابد (Defraeye et al., 2013). ونگ و همکاران (Wang et al., 1989) و جیا و همکاران (Geya et al., 2013) از MRI برای تجزیه و تحلیل غیرمخرب شکست هسته میوه در گلابی رقم "بارتل" استفاده کردند. لارماتین و همکاران (Lammertyn et al., 2003) از رگرسیون منطقی برای مطالعه فاکتورهایی که شکست هسته گلابی رقم "کانفرنس" را تحت تأثیر قرار می‌دهند استفاده کردند. ناهنجاری شکست هسته در گلابی‌ها، که به دلیل گسترش حفرات و تغییر رنگ قهوه‌ای بافت صورت می‌گیرد، معمولاً به دلیل شرایط دوره نگهداری از جمله افزایش سطح CO_2 و کاهش O_2 ایجاد می‌شود. MRI قادر به تمایز بین بافت سالم، قهوه‌ای و حفرات بود. اگرچه، تخمین‌های درصد بافت قهوه‌ای شده که مبتنی بر MRI بود، راحت، سریع و از لحاظ کمی برتر بودند (Lammertyn et al., 2003; Hernandez-Sanchez et al., 2007). کیمورا و همکاران، اندازه‌گیری MRI میوه گلابی ژاپنی را در یک باغ تحقیقاتی یا استفاده از مغناطیس دائمی با شدت ۰/۱۲ تسلا گزارش کردند (Kimura et al., 2001). مقادیر T_1 میوه‌های گلابی با استفاده از توالی بازیابی معکوس (IR) اندازه‌گیری شدند. جیا و همکاران، پارامترهای طولی NMR میوه گلابی ژاپنی را با استفاده از سیستم MRI الکتریکی متحرک با مغناطیس دائم با شدت ۰/۲ تسلا اندازه‌گیری کردند (Geya et al., 2013). این مطالعات امکان اجرای مطالعات NMR/MRI در باغات قبل از برداشت میوه‌ها را نشان می‌دهد. NMR میدان ضعیف و 1H -MRI برای ارزیابی قابلیت ذخیره‌سازی میوه هلو زرد "Jinxiu" با استفاده از تغییرات در زمان آسایش عرضی (T_2)، شدت سیگنال (A_2)، و تصاویر میوه‌های هلو زرد "Jinxiu" استفاده شد (Zhou et al., 2016). گلابی رقم "درگری" به کوفتگی‌های ناشی از ضربات مکانیکی و فشاری حساس است. طی بررسی انجام شده، اثر نیرو و زمان انبارداری بر انتشار حجم کوفتگی گلابی با کمک داده‌های تصویری سه بعدی به‌دست آمده از MRI محاسبه شد. نیروی اعمالی منجر به افزایش خطی حجم کوفتگی در طول دوره دوره انبارداری شد، درحالی‌که اثر زمان نگهداری بر انتشار کوفتگی غیرخطی بود. زمان بهینه برای مصرف محصول، با حداقل آسیب، ۱۲ روز بعد از بارگزاری و یا ضربات خارجی ناشی از برداشت یا انبارداری تخمین زده شد (Razavi et al., 2014).



یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران



(2018). MRI کمی برای اندازه‌گیری پارامترهای آسایش T_1 و T_2 در طول رشد و رسیدن میوه استفاده شد. این پارامترها حتی با وجود افزایش ۲۰٪ غلظت قند آزاد کل در بافت و ۶۸٪ محتوی جامد محلول بدون تغییر باقی ماندند (Clark, 1998a, b). تجزیه و تحلیل محلول‌ها و آب‌میوه‌ها نشان داد که نرخ‌های آسایش نسبت به افزایش ترکیب قند حساس هستند اما به تغییرات اسیدهای آلی و پکتین محلول در غلظت‌های مختلف نسبتاً حساسیت ندارند.

MRI با وزن چگالی و T_2 برای ارزیابی اثر شرایط نگهداری، مانند دما و رطوبت نسبی، روی تغییرات ساختاری بافت کیوی استفاده شد (Taglienti et al., 2009). تغییرات مشاهده شده در موفولوژی داخلی مرتبط با T_2 نواحی مشخص و نرم شدن میوه‌ها بود. توانایی مشاهده تغییرات وابسته به زمان که در مطالعات پیشین غیرقابل مشاهده بودند به دلیل استفاده از مکانیزم کنتراست مختلف بود. MRI را می‌توان برای شناسایی آب و توزیع قند در یک دانه بلوبری قبل و بعد از انجام آب شدن یخ به کار برد (Vicente et al., 2007). انتخاب سیگنال آب یا قند با کنترل زمان بازیابی معکوس امکان‌پذیر است (Gamble, 1994). انجماد/آب شدن یخ می‌تواند غشاهای نگهدارنده آب درون مکان‌های مجزا در بافت میوه را پاره کند. این امر به دلیل نفوذ به بافت‌های دیگر موجب تغییر در نسبت آب تغییر یافته (برای مثال، هیدروژن پیوند داده شده یا تبادل شده از لحاظ شیمیایی) به تغییر نیافته (برای مثال، متحرک و نه تبادل شده از لحاظ شیمیایی) در آن نواحی می‌شود، همچنین، به دلیل نفوذ به دیگر بافت‌ها، موجب تغییر پیوسته در غلظت قند می‌شود (Gamble, 1994). MRI برای تصویربرداری از ساختار داخلی پرتقال ماندین به منظور شناسایی غیرمخرب دانه استفاده شد (Barreiro et al., 2008). چندین روش اکتساب داده و تجزیه و تحلیل داده ارزیابی شدند و بهترین ترکیب نتیجه‌ای با دقت ۱۰۰٪ شناسایی دانه ارائه کرد (Barreiro et al., 2008). MRI برای نظارت بر رسیدگی، فساد و آسیب در پرتقال رقم والنسیا که با پلیمر بیورند پوشانده شده بود استفاده شد (Galed et al., 2004). بیورند پوششی حاوی کیتوزان است و فیلم فعال آن رهایش تدریجی عوامل نگهدارنده برای جلوگیری از رشد قارچ را ممکن می‌سازد.

شکاف خوردن میوه یک ناهنجاری فیزیولوژیکی قبل از برداشت است که در برخی گونه میوه‌های مهم از لحاظ تجاری مانند، پرتقال ارقام ناول، والنسیا و ماندین رخ می‌دهد. MRI برای مطالعه و پیش‌بینی احتمال شکاف خوردن میوه استفاده شد (Zur et al., 2017). شکاف خوردن را می‌توان ۲ ماه زودتر از رخ دادن آن پیش‌بینی کرد. برش‌های MRI با وزن T_2 در شدت ۱/۵ تسلا برای ۴ درجه کیفی انار ملس ترش تهیه شد: نیمه رسیده، رسیده، بیش از حد رسیده، و با آسیب‌های داخلی. پارامترهای ماتریس هم‌رخداد درجه خاکستری (GLCM) و ماتریس مدت اجرا پیکسل (PRLM) برای طبقه‌بندی استفاده شدند. دقت‌های طبقه‌بندی برای دسته‌های نیمه‌رسیده، رسیده، بیش از حد رسیده و با آسیب داخلی به ترتیب ۱۰۰، ۹۸/۴۷، ۱۰۰ و ۹۵٪ بودند. دقت میانگین طبقه‌بندی برای ویژگی‌های GLCM و PRLM به ترتیب برابر با ۹۵/۷۵ و ۹۱/۲۸٪ بود (Khoshroo et al., 2009).

اگر اکتساب سیگنال‌های MRI برای اجسام در حال حرکت وجود داشته باشد، رسیدن به توان عملیاتی بالا برای کاربردهای کنترل کیفی را ممکن می‌سازد (Hills et al., 2006). حرکت اجسام ممکن است شامل استفاده از تسمه نقاله در حالت پیوسته و یا حالت توقف و حرکت باشد. بررسی مؤثر کیفیت براساس MRI/NMR نیازمند آن است که داده‌ها در زمان کوتاه به دست آیند؛ ترجیحاً یک ثانیه و یا کمتر برای هر میوه. تکنیک‌های تصویربرداری مدرن مانند تصویربرداری اکتشافی را می‌توان برای دستیابی به داده‌های کامل مورد نیاز برای تصویر دو بعدی MRI در زمانی کمتر از یک ثانیه (وقتی که بعد از آن که شیء به تعادل اسپین در میدان مغناطیسی برسد) به کار بست (Stehling et al., 1991). این آزمایشات نشان دادند که ابزار MRI وضوح بالا و بسط آن به میدان‌های مغناطیسی با شدت پایین برای کاربردهای اطمینان کیفیت/کنترل کیفیت هنوز یک چالش محسوب می‌شود. نمونه‌های آزمایشی سیستم‌های NMR/MRI قادر به درجه‌بندی میوه‌های براساس آسیب‌های داخلی، در سرعت‌های ۱۰-۱۲ m/s، اخیراً نشان داده شده‌است (McCarthy et al., 2016). این سرعت‌ها ممکن است برای استفاده در عملیات بسته‌بندی تجاری میوه‌ها کافی باشد. تسریع و تکنیک‌های تصحیح حرکت که اخیراً برای MRI در زمینه پزشکی توسعه یافته‌است (Haged et al., 2015)، می‌توانند برای MRI میوه‌ها روی تسمه‌نقاله‌ها استفاده شوند و انتظار می‌رود اثر مهمی روی بازده کاربردهای اینچنینی داشته باشند.

۴- نتیجه‌گیری

کاربردهای مرور شده در این مقاله بست‌پذیری MRI برای شناسایی آسیب‌ها، ارزیابی کیفیت و تعیین مرحله رسیدگی میوه‌های سیب، هندوانه، پرتقال، هلو، گلابی و انار را نشان می‌دهد. اگرچه تکنیک‌های غیرمخرب دیگری برای بررسی کیفیت میوه و مرحله رسیدگی در دسترس است، اغلب آن‌ها فقط برای ارزیابی خصوصیات ویژه و برای گونه خاصی از میوه‌ها قابل اجرا است. فناوری‌های نویدبخش در شرایط کنونی، که پتانسیل گسترش تشدید مغناطیسی برای ارزیابی کیفیت میوه‌ها و پیش‌بینی وضعیت رسیدگی میوه را داشته باشد، MRI با شدت میدان کم، MRI متحرک، MRI از اجسام در حال حرکت روی تسمه نقاله می‌باشند.



- Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest biology and technology*, 15(3), 207-225.
- Abbott, J. A., Lu, R., Upchurch, B. L., & Stroschine, R. L. (1997). Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. *Horticultural reviews*, 20, 1-120.
- Barreiro, P., Ortiz, C., Ruiz-Altisent, M., Ruiz-Cabello, J., Fernández-Valle, M. E., Recasens, I., & Asensio, M. (2000). Mealiness assessment in apples and peaches using MRI techniques. *Magnetic Resonance Imaging*, 18(9), 1175-1181.
- Barreiro, P., Zheng, C., Sun, D. W., Hernández-Sánchez, N., Perez-Sanchez, J. M., & Ruiz-Cabello, J. (2008). Non-destructive seed detection in mandarins: Comparison of automatic threshold methods in FLASH and COMSPIRA MRIs. *Postharvest Biology and Technology*, 47(2), 189-198.
- Blink, E. J. (2004). Basic MRI physics. 2nd. Retrieved, 19(12), 2014.
- Boyle, G. (2004). *The MRI Physics Resource*. Online: <http://www.mrinotes.com>
- Brant, W. E., & de Lange, E. E. (Eds.). (2012). *Essentials of body MRI*. OUP USA.
- Brummell, D. A. (2006). Cell wall disassembly in ripening fruit. *Functional Plant Biology*, 33(2), 103-119.
- Chen, P., & Sun, Z. (1991). A review of non-destructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 49, 85-98.
- Clare, S. (1997). Functional MRI: methods and applications. *University of Nottingham*, 155.
- Clark, C. J., & Burmeister, D. M. (1999). Magnetic Resonance Imaging of Browning Development in Braeburn Apple during Controlled-atmosphere Storage under High CO₂. *HortScience*, 34(5), 915-919.
- Clark, C. J., & MacFall, J. S. (2003). Quantitative magnetic resonance imaging of 'Fuyu' persimmon fruit during development and ripening. *Magnetic Resonance Imaging*, 21(6), 679-685.
- Clark, C. J., Drummond, L. N., & MacFall, J. S. (1998a). Quantitative NMR imaging of kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) during growth and ripening. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 78(3), 349-358.
- 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), 1-21.
- Clark, C. J., MacFall, J. S., & Bielecki, R. L. (1998b). Loss of watercore from Fuji apple observed by magnetic resonance imaging. *Scientia Horticulturae*, 73(4), 213-227.
- Colnago, L. A., Andrade, F. D., Souza, A. A., Azeredo, R. B., Lima, A. A., Cerioni, L. M., ... & Pusioli, D. J. (2014). Why is inline NMR rarely used as industrial sensor? Challenges and opportunities. *Chemical Engineering & Technology*, 37(2), 191-203.
- Defraeye, T., Lehmann, V., Gross, D., Holat, C., Herremans, E., Verboven, P., ... & Nicolai, B. M. (2013). Application of MRI for tissue characterisation of 'Braeburn' apple. *Postharvest biology and technology*, 75, 96-105.
- Farhat, I. A., Belton, P. S., & Webb, G. A. (Eds.). (2007). *Magnetic resonance in food science: from molecules to man* (No. 310). Royal Society of Chemistry.
- Faust, M., Wang, P. C., & Maas, J. (1997). The use of magnetic resonance imaging in plant science. *Horticultural reviews*, 20, 225-266.
- Faust, M., Wang, P. C., & Maas, J. (2010). The use of magnetic resonance imaging in plant science. *Horticultural reviews*, 20, 225-266.
- Galed, G., Fernández-Valle, M. E., Martínez, A., & Heras, A. (2004). Application of MRI to monitor the process of ripening and decay in citrus treated with chitosan solutions. *Magnetic Resonance Imaging*, 22(1), 127-137.
- GAMBLE, G. R. (1994). Non-invasive determination of freezing effects in blueberry fruit tissue by magnetic resonance imaging. *Journal of food science*, 59(3), 571-573.
- Geya, Y., Kimura, T., Fujisaki, H., Terada, Y., Kose, K., Haishi, T., ... & Sekozawa, Y. (2013). Longitudinal NMR parameter measurements of Japanese pear fruit during the growing process using a mobile magnetic resonance imaging system. *Journal of Magnetic Resonance*, 226, 45-51.
- Giancoli, D. C. (1998). *Physics: principles with applications* (No. QC 23. G52 1998).
- Gonzalez, J. J., Valle, R. C., Bobroff, S., Biasi, W. V., Mitcham, E. J., & McCarthy, M. J. (2001). Detection and monitoring of internal browning development in 'Fuji' apples using MRI. *Postharvest biology and technology*, 22(2), 179-188.
- Hegde, S. S., Zhang, Y., & Bottomley, P. A. (2015). Acceleration and motion-correction techniques for high-resolution intravascular MRI. *Magnetic resonance in medicine*, 74(2), 452-461.
- Hernández-Sánchez, N., Barreiro, P., & Ruiz-Cabello, J. (2006). On-line identification of seeds in mandarins with magnetic resonance imaging. *Biosystems engineering*, 95(4), 529-536.
- Hills, B. P., & Wright, K. M. (2006). Motional relativity and industrial NMR sensors. *Journal of Magnetic Resonance*, 178(2), 193-205.
- Khoshroo, A., Keyhani, A., Zoroofi, R. A., Rafiee, S., Zamani, Z., & Alsharif, M. R. (2009). Classification of pomegranate fruit using texture analysis of MR images. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
- Kimura, T., Geya, Y., Terada, Y., Kose, K., Haishi, T., Gemma, H., & Sekozawa, Y. (2011). Development of a mobile



- magnetic resonance imaging system for outdoor tree measurements. *Review of scientific instruments*, 82(5), 053704.
- Lammertyn, J., Dresselaers, T., Van Hecke, P., Jancsó, P., Wevers, M., & Nicolai, B. M. (2003). MRI and X-ray CT study of spatial distribution of core breakdown in 'Conference' pears. *Magnetic Resonance Imaging*, 21(7), 805-815.
- Marigheto, N., Venturi, L., & Hills, B. (2008). Two-dimensional NMR relaxation studies of apple quality. *Postharvest Biology and Technology*, 48(3), 331-340.
- McCarthy, M. J., Zhang, L., McCarthy, K. L. & Coulthard, T. (2016). Status and future of magnetic resonance imaging sensors for in-line assessment and sorting of fruit. *Acta Horticulturae (1119)*: 121–126.
- McRobbie, D. W., Moore, E. A., & Graves, M. J. (2017). *MRI from Picture to Proton*. Cambridge university press.
- Melado-Herreros, A., Munoz-García, M. A., Blanco, A., Val, J., Fernández-Valle, M. E., & Barreiro, P. (2013). Assessment of watercore development in apples with MRI: Effect of fruit location in the canopy. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 125-133.
- Razavi, M. S., Asghari, A., Azadbakht, M. & Shamsabadi, H. A. (2014). Investigation of Bruised Volume Propagation Process of "Dargazi Pear" Caused by Static Loading Versus the Passage of Time by Image Processing of MR. Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
- Razavi, M. S., Asghari, A., Azadbakht, M. & Shamsabadi, H. A. (2018). Analyzing the pear bruised volume after static loading by magnetic resonance imaging (MRI). *Sci Hortic* 229: 33–39.
- Schild, H. H. (1990). *MRI Made Easy*. Schering AG Berlin/Bergkamen. (Modified from Alastair G. Smith, Surgeons Hall, Edinburgh, October 1939). ISBN: 3-921817-41-2.
- Schmidt, S. J., Sun, X., Litchfield, J. B., & Eads, T. M. (1996). Applications of magnetic resonance imaging in food science. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 36(4), 357-385.
- Stehling, M. K., Turner, R., & Mansfield, P. (1991). Echo-planar imaging: magnetic resonance imaging in a fraction of a second. *Science*, 254(5028), 43-50.
- Taglienti, A., Massantini, R., Botondi, R., Mencarelli, F., & Valentini, M. (2009). Postharvest structural changes of Hayward kiwifruit by means of magnetic resonance imaging spectroscopy. *Food Chemistry*, 114(4), 1583-1589.
- Vicente, A. R., Ortugno, C., Rosli, H., Powell, A. L., Greve, L. C., & Labavitch, J. M. (2007). Temporal sequence of cell wall disassembly events in developing fruits. 2. Analysis of blueberry (*Vaccinium* species). *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(10), 4125-4130.
- Wang, C. Y. & Wang, P. C. (1989). Non-destructive detection of core breakdown in 'Bartlett' pears with nuclear magnetic resonance imaging. *Scientia Hortica* 24(1), 106–109.
- Zhou, H. J., Ye, Z. W., Yu, Z. F., Su, M. S., & Du, J. H. (2016). Application of low-field nuclear magnetic resonance and proton magnetic resonance imaging in evaluation of 'Jinxia' yellow peach's storage suitability. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 633-643.
- Zion, B., Chen, P., & McCarthy, M. J. (1995). Nondestructive quality evaluation of fresh prunes by NMR spectroscopy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 67(4), 423-429.
- Zur, N., Shlizerman, L., Ben-Ari, G., & Sadka, A. (2017). Use of magnetic resonance imaging (MRI) to study and predict fruit splitting in citrus. *The Horticulture Journal*, 86(2), 151-158.

مکانیزاسیون و مکانیزاسیون ایران