



مروری بر کاربردهای روش‌های پردازش تصویر بر کنترل کیفیت محصولات غذایی-بخش دوم: روش‌های

مبتنی بر مدل و مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی در پردازش بافتار

سجاد قدرتی^۱، محسن محسنی^۲، سعیده گرجی کندی^{۳*}

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳.

۲- استاد، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳.

۳- استادیار، دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، صندوق پستی ۱۵۸۷۵-۴۴۱۳.

تاریخ دریافت: ۹۵/۵/۲۱ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۵/۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۵/۸/۲۵ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۵/۱۰/۱۸

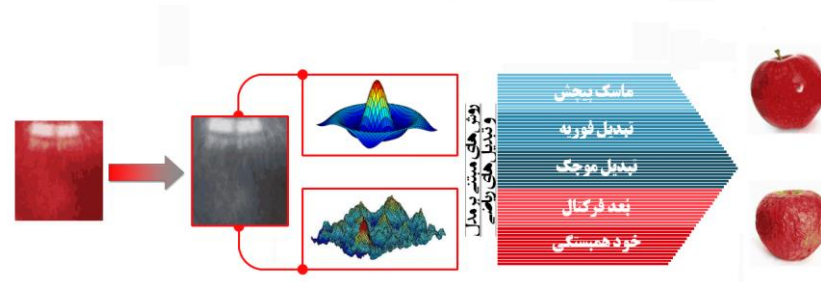
چکیده

با افزایش حساسیت‌های قانونی و انتظارات مصرف‌کنندگان در ارتباط با کیفیت محصولات غذایی، نیاز به ارزیابی دقیق و سریع این محصولات در صنایع غذایی روبه افزایش است. بنیایی ماشین با بهره‌گیری از روش‌های پردازش تصویر امکان نظارت مکانیزه و غیرمخرب بر کیفیت محصولات غذایی را فراهم نموده است. بافتار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تصویر، در کنترل کیفیت محصولات غذایی در سال‌های اخیر به‌طور گسترده به کار گرفته شده است. بطور کلی روش‌های ارزیابی بافتار به چهار دسته‌ی آماری، ساختاری، روش‌های مبتنی بر مدل و مبتنی بر تبدیل تقسیم‌بندی می‌شود. در بخش اول این پژوهش به مبانی پردازش بافتار تصویر با استفاده از روش‌های آماری پرداخته شد. موضوع مورد بحث در بخش دوم، روش‌های مبتنی بر مدل و تبدیل‌های ریاضی در پردازش بافتار است. روش‌های مبتنی بر مدل با در نظر گرفتن مدلی ریاضی جهت یافتن ارتباط بین سطح روشنایی پیکسل‌ها عمل می‌نمایند؛ در حالی که روش‌های مبتنی بر تبدیل با استفاده از کمیت‌های حاصل از تصاویر انتقال یافته توسط تبدیل‌های ریاضی، توصیفی از بافتار به‌دست می‌دهند. در پژوهش حاضر پس از معرفی نحوه‌ی عملکرد روش‌های مذکور، مثال‌هایی از پژوهش‌های اخیر ارائه شده است که با به‌کارگیری بافتار تصویر کمی شده به وسیله‌ی این روش‌ها، کنترل کیفیت مواد غذایی را ممکن ساخته‌اند. نتایج حاصل از تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که پس از روش‌های آماری، روش‌های مبتنی بر مدل و تبدیل‌های ریاضی در صنایع غذایی در جایگاه دوم (از نظر دقت عملکرد و محبوبیت به‌کارگیری) قرار می‌گیرند.

واژه‌های کلیدی

بافتار تصویر، صنایع غذایی، روش‌های مبتنی بر مدل، روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی، تبدیل فوریه، بُعد فرکتال.

چکیده تصویری





A review on Applications of Image Processing Methods on Food Product's Quality Control- Part B: Model-Based and Transform-Based Texture Processing Methods

S. Ghodrati, M. Mohseni, S. Gorji Kandi*

Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, P. O. Box 15875-4413.

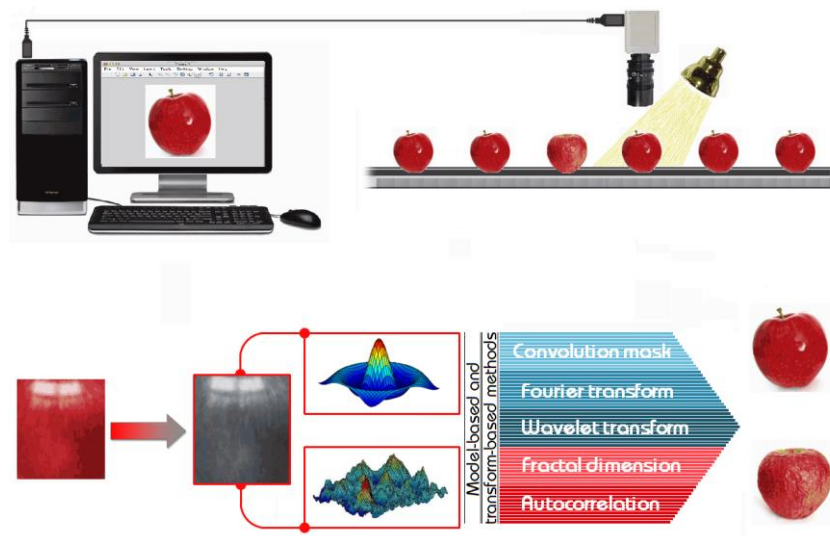
Abstract

Consumers increased expectations of high quality food products as well as stringent regulations has increased the need for an accurate and fast method for quality assessment and control of the products in food industries. Machine vision with the aid of various image processing methods has been introduced as an objective, automate, and non-destructive approach capable for food quality control. Texture as one of the most important image's features has been used extensively in food quality monitoring applications. Generally, quantitative texture assessment methods are divided into four groups: statistical, structural, model-based, and transform-based methods. In the first part of this research (part A), the principles of the statistical image texture processing methods were reviewed. The subject of the second part (part B) is model-based and transform-based texture processing methods. Model-based methods quantify image texture by considering a mathematical equation explaining relation between pixels' intensities, while transform-based methods extract textural features of an image which is transformed by mathematical transforms. In the present paper, at first mechanisms of these groups of texture evaluation methods have been presented. Then, examples of recent studies related to employments of image texture in quality control of food products have been reviewed. The results of the previous studies indicate that after statistical methods, model-based and transform-based methods are the most accurate and popular texture evaluation methods in food industries.

Keywords

Image texture, Food industries, Model-based methods, Transform-based methods, Fourier transform, Fractal dimension.

Graphical abstract



۱- مقدمه

از این روش‌ها در کنترل کیفیت محصولات غذایی از مرجع مرور می‌گردد. در انتها، مقایسه‌ای بین روش‌های اصلی پردازش بافتار از دیدگاه دقت عملکرد و محبوبیت به‌کارگیری در صنایع غذایی ارائه می‌گردد.

۲- روش‌های توصیف کمی بافتار تصویر

۲-۱- روش‌های مبتنی بر تبدیل

۲-۱-۱- ماسک پیچش

به طور کلی می‌توان گفت ماسک پیچش یک تصویر رقومی را از نمایش فضایی^۷ (نمایش پیکسلی) به نمایش شیئی^۸ انتقال می‌دهد. به این معنی که بعد از انتقال تصویر توسط ماسک پیچش، ویژگی‌هایی مانند لبه‌ها، نقاط و جزیره‌ها، خطوط یا ترکیبی از آنها در تصویر انتقال یافته ظاهر می‌شود [۳]. از آنجایی که بافتار تصویر ترکیبی از نقاط، جزیره‌ها، خطوط، لبه‌ها و مرزها است؛ بنابراین می‌توان با استفاده از تصاویر انتقال یافته توسط ماسک‌های پیچش متفاوت توصیف‌های کمی مختلفی از بافتار تصویر به دست آورد. ماسک پیچش به صورت ماتریسی با ابعاد $m \times n$ است. در صورتی که ماسک پیچش را با $M(k, l)$ نشان دهیم آنگاه تصویر انتقال یافته توسط این ماسک از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$F(x, y) = \sum_{k=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}} \sum_{l=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} M\left(k + \left\lfloor \frac{m}{2} \right\rfloor + 1, l + \left\lfloor \frac{n}{2} \right\rfloor + 1\right) I(x + k, y + l) \quad (1)$$

$I(x, y)$: سطح روشنایی پیکسل (x, y) را نشان می‌دهد.

⁷ Spatial representation

⁸ Object representation

در بخش اول این پژوهش دلایل الزام جایگزینی روش‌های ارزیابی انسانی با روش‌های مکانیزه در کنترل کیفیت محصولات غذایی به تفصیل مرور گردید [۱]. همچنین اهمیت روش بینایی ماشین^۱ و پردازش تصویر به عنوان روشی کارآمد، سریع و دقیق در این ارتباط توضیح داده شد. تصویر رقومی^۲ و اجزای اصلی سامانه‌های بینایی ماشین از دیگر موارد مورد بحث در بخش اول این پژوهش است. بافتار^۳ به عنوان یک ویژگی مهم در تصاویر رقومی که در بردارنده‌ی اطلاعات مفیدی در ارتباط با ماهیت و کیفیت اشیاء و مواد است در بخش اول این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین روش‌های آماری به عنوان یکی از روش‌های اصلی توصیف کمی بافتار در بخش اول ارائه گردید. در این بخش با تکیه بر مفاهیم و مبانی ارائه شده در بخش اول، به دو دسته‌ی مهم دیگر از روش‌های توصیف کمی بافتار یعنی روش‌های مبتنی بر مدل و روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی پرداخته می‌شود. به طور کلی مرسوم‌ترین روش‌های مبتنی بر مدل، روش بُعد فرکتال و روش خودهمبستگی هستند (شکل ۱). از آنجائیکه روش بُعد فرکتال در صنایع غذایی کاربرد بیشتری دارد برای رعایت ایجاز از پرداختن به روش خودهمبستگی پرهیز شده و تنها روش بُعد فرکتال توضیح داده می‌شود. روش ماسک پیچش^۴، تبدیل فوریه^۵ و تبدیل موجک^۶ رایج‌ترین روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی محسوب می‌شوند (شکل ۱) [۲] که در ادامه به شرح هر یک از این روش‌ها مبادرت می‌شود. در قدم بعدی کاربردهای هر یک

¹ Machine vision

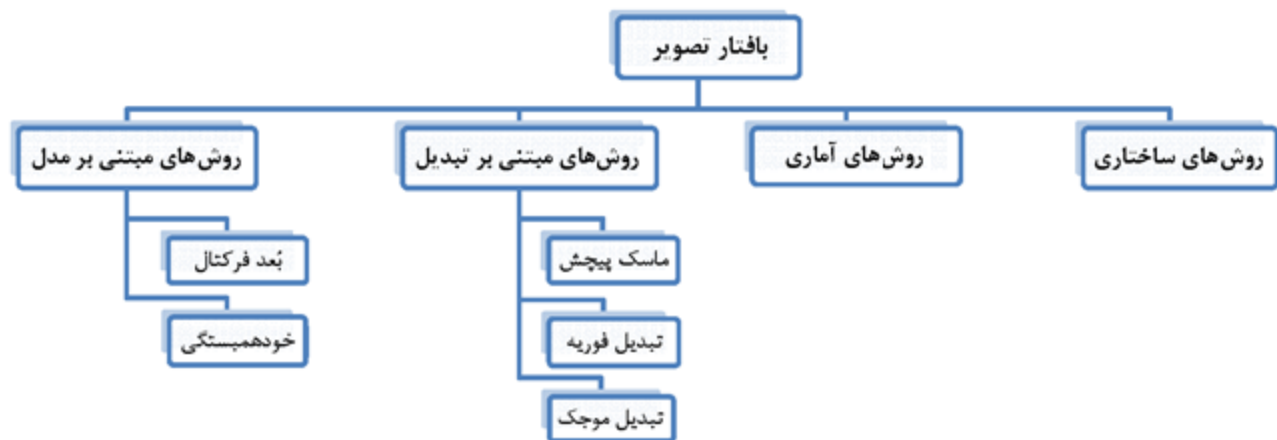
² Digital

³ Texture

⁴ Convolution mask

⁵ Fourier transform

⁶ Wavelet transform



شکل ۱- تقسیم‌بندی روش‌های توصیف کمی بافتار تصویر [۱].

تبدیل می‌تواند در ارزیابی کمی بافتار تصویر به عنوان ابزاری قدرتمند بکار گرفته شود [۷]. با توجه به بخش ۲-۱-۲ ملاحظه می‌شود که آنچه در تبدیل فوریه صورت می‌پذیرد در واقع ضرب کردن اطلاعات تصویر رقمی در توابع نمایی متناوب مختلط است. در گام بعدی مجموع این حاصل ضرب برای تمام پیکسل‌های موجود در تصویر محاسبه می‌شود. این حقیقت در واقع بیان می‌کند که تبدیل فوریه تنها نشان می‌دهد که آیا یک فرکانس خاص در تصویر وجود دارد یا خیر، اما هیچ اطلاعاتی در مورد مختصات مکانی متناظر با پدیداری آن فرکانس در اختیار نمی‌گذارد. ابتدا برای رفع این مشکل ایده‌ی استفاده از تبدیل فوریه زمان کوتاه^۴ ارائه گردید. مطابق این روش تصویر به پنجره‌هایی به حد کافی کوچک تقسیم می‌شود و تبدیل فوریه بر روی این پنجره‌ها اعمال می‌گردد. بدین ترتیب می‌توان دریافت که یک فرکانس خاص در چه محدوده‌ی مکانی رخ داده است. باید توجه داشت که بر اساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ^۵ دقیقاً نمی‌توان تعیین کرد که یک فرکانس در چه مکانی رخ می‌دهد؛ بلکه تنها می‌توان بازه مکانی محل وقوع یک فرکانس را مشخص نمود. در صورتی که ابعاد پنجره کاهش یابد اطلاعات مکانی دقیق‌تر شده اما اطلاعات فرکانسی دقت کمتری خواهد داشت و برعکس. بنابراین باید نوعی توازن بین اطلاعات مکانی و فرکانسی ایجاد گردد. تبدیل موجک برای سهولت ایجاد این توازن ارائه گردید چرا که ابعاد پنجره در تبدیل موجک بر خلاف تبدیل فوریه زمان کوتاه متغیر است. در تبدیل موجک ابعاد پنجره‌ی مکانی در فرکانس‌های بالا، کوچک انتخاب می‌شود و با کاهش فرکانس، ابعاد پنجره افزایش می‌یابد [۸]. برای انتقال یک تصویر توسط تبدیل موجک، به یک تابع مقیاس^۶ دو بعدی (رابطه ۳) احتیاج است. تابع مقیاس، معیاری از فرکانس است که با آن ارتباط معکوس دارد.

به عنوان پراستفاده‌ترین ماسک‌های پیچش می‌توان به عملگرهای سبل^۱ اشاره نمود. این ماسک‌ها به صورت ماتریس‌های ۳×۳ مطابق شکل ۲ الف هستند [۳]. یک مثال از نحوه‌ی انتقال تصویر توسط ماسک پیچش سبل در شکل ۲ ب نمایش داده شده است. تصویر انتقال یافته یا نتایج آماری به‌دست آمده از آن می‌تواند معیاری کمی از بافتار باشد.

۲-۱-۲- تبدیل فوریه

با استفاده از تبدیل فوریه، تصویر از حوزه‌ی فضایی (پیکسلی) به حوزه‌ی فرکانسی^۲ انتقال می‌یابد. حجم و زمان محاسبات در حوزه‌ی فرکانسی به طور قابل توجهی کمتر از حوزه‌ی فضایی است [۴]. تبدیل فوریه می‌تواند جهت توصیف کمی بافتار کلی و بزرگ مقیاس تصویر به کار رود. از سوی دیگر با تجزیه‌ی تصویر حوزه‌ی فرکانس به بازه‌های فرکانسی کوچک‌تر می‌توان بافتار کوچک مقیاس یا ویژگی‌های خاص در بافتار مدنظر نظیر الگوهای تکرار شونده را به صورت کمی بیان نمود [۵]. برای انتقال یک تصویر رقمی از حوزه‌ی فضایی به حوزه‌ی فرکانسی با استفاده از تبدیل فوریه، مطابق رابطه‌ی ۲ عمل می‌شود.

$$F(u, v) = \frac{1}{XY} \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} f(x, y) \exp\left(\frac{-2i\pi}{X} ux\right) \exp\left(\frac{-2i\pi}{Y} vy\right) \quad (2)$$

رابطه ۲ تبدیل فوریه گسسته نام دارد که در آن u و v فرکانس فضایی^۳ نامیده می‌شوند. X و Y ابعاد تصویر بر حسب پیکسل هستند. x و y مختصات پیکسل را نشان می‌دهند [۶].

۲-۱-۳- تبدیل موجک

تبدیل موجک امکان تحلیل چند مقیاسی تصویر را فراهم می‌کند. با توجه به اینکه بافتار تصویر نیز یک ویژگی وابسته به مقیاس است، این

⁴ Short-time Fourier transform

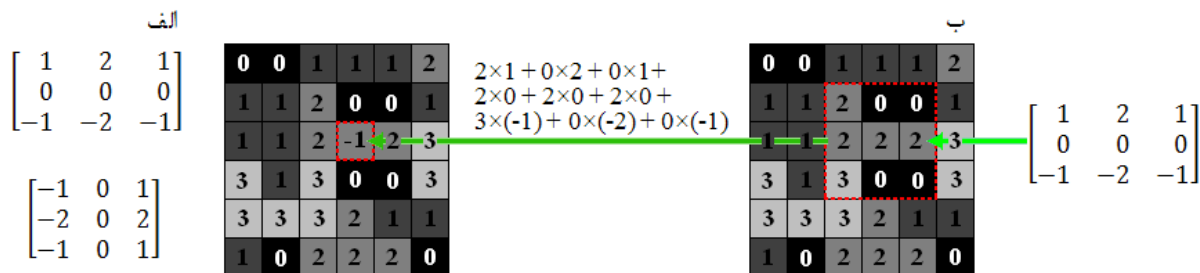
⁵ Heisenberg's uncertainty principle

⁶ Scale

¹ Sobel operators

² Frequency domain

³ Spatial frequency



شکل ۲- نحوه‌ی انتقال تصویر توسط ماسک پیچش: الف) عملگرهای سبل به عنوان یکی از پراستفاده‌ترین ماسک‌های پیچش و ب) نحوه‌ی اعمال عملگر سبل بر روی یکی از پیکسل‌های تصویر (پیکسلی با سطح روشنایی ۲).

$$f(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \varphi_{j,m,n}(x, y) \quad (11)$$

$$D^H(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \psi_{j,m,n}^H(x, y) \quad (12)$$

$$D^V(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \psi_{j,m,n}^V(x, y) \quad (13)$$

$$D^D(j, m, n) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x, y) \psi_{j,m,n}^D(x, y) \quad (14)$$

z نشان‌دهنده مرحله تجزیه بوده به طوری که $j=0,1,2,\dots,J-1$ و $m, n=0,1,2,\dots, 2^j-1$ و $N=M=2^J$ است.

طی هر مرحله انتقال تصویر توسط تبدیل موجک، تصویر به ۴ جزء f, D^H, D^V و D^D تجزیه می‌گردد. f در بردارنده‌ی اطلاعات کلی تصویر (اطلاعات فرکانس پایین) است و تقریباً نامیده می‌شود. D^H, D^V و D^D به ترتیب در بردارنده‌ی جزئیات تصویر (اطلاعات فرکانس بالا) در راستای افقی، عمودی و قطری هستند و جزئیات^۳ نامیده می‌شوند. در هر مرحله تجزیه، جزئیات کنار گذاشته می‌شود و تبدیل موجک بر روی تقریب اعمال می‌گردد (شکل ۳). تصویر اصلی را می‌توان از حاصل جمع اجزای به‌دست آمده از مراحل مختلف تجزیه به‌دست آورد. به این صورت که اگر تصویر مدنظر n بار تجزیه شود، تصویر اولیه از مجموع تقریب آخرین مرحله و جزئیات تمام مراحل قابل دستیابی است (شکل ۳). اجزای به‌دست آمده از تصویر در هر مرحله‌ی تجزیه توسط تبدیل موجک می‌تواند به عنوان یک‌ویژگی برای توصیف کمی بافتار به کار گرفته شود [۹].

² Approximation

³ Detail

$$\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y) \quad (3)$$

همچنین به سه تابع موجک دو بُعدی به صورت رابطه‌های ۴-۶ نیاز است. موجک‌ها (به معنی موج‌های کوچک) همان توابع پنجره هستند.

$$\psi^H(x, y) = \psi(x)\varphi(y) \quad (4)$$

$$\psi^V(x, y) = \varphi(x)\psi(y) \quad (5)$$

$$\psi^D(x, y) = \psi(x)\psi(y) \quad (6)$$

Ψ^H, Ψ^V و Ψ^D به ترتیب تغییرات سطح روشنایی پیکسل‌ها را در جهت افقی، عمودی و قطری مورد ارزیابی قرار می‌دهند [۹].

شکل گسسته و دودویی^۱ توابع مقیاس و موجک به صورت رابطه‌های ۷-۱۰ بیان می‌شود:

$$\varphi_{j,m,n}(x, y) = 2^{\frac{j}{2}} \varphi(2^j x - m, 2^j y - n) = 2^{\frac{j}{2}} \varphi(2^j x - m) \varphi(2^j y - n) \quad (7)$$

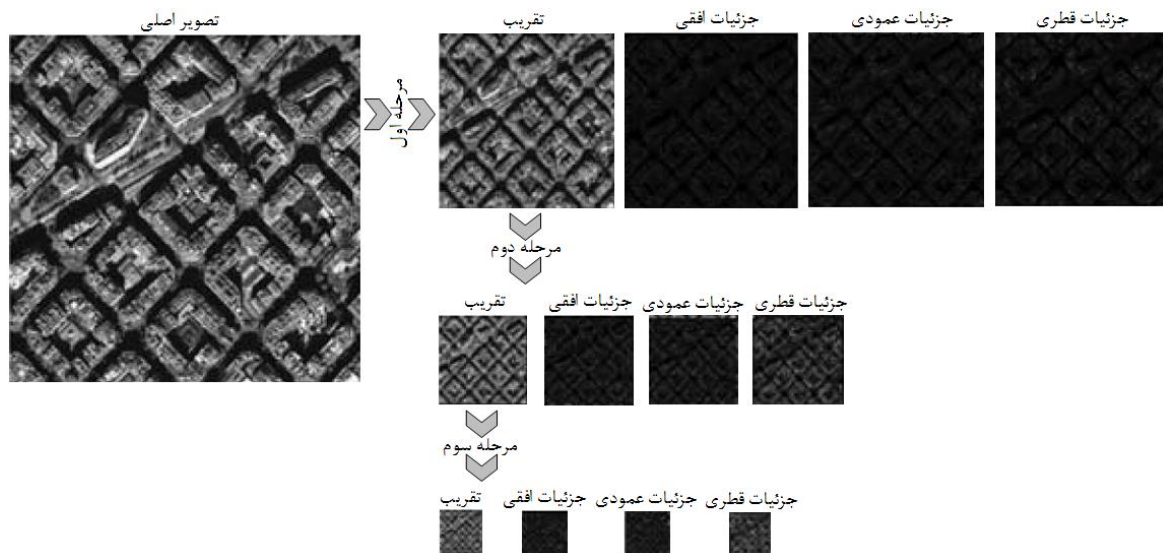
$$\psi_{j,m,n}^H(x, y) = 2^{\frac{j}{2}} \psi^H(2^j x - m, 2^j y - n) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - m) \varphi(2^j y - n) \quad (8)$$

$$\psi_{j,m,n}^V(x, y) = 2^{\frac{j}{2}} \psi^V(2^j x - m, 2^j y - n) = 2^{\frac{j}{2}} \varphi(2^j x - m) \psi(2^j y - n) \quad (9)$$

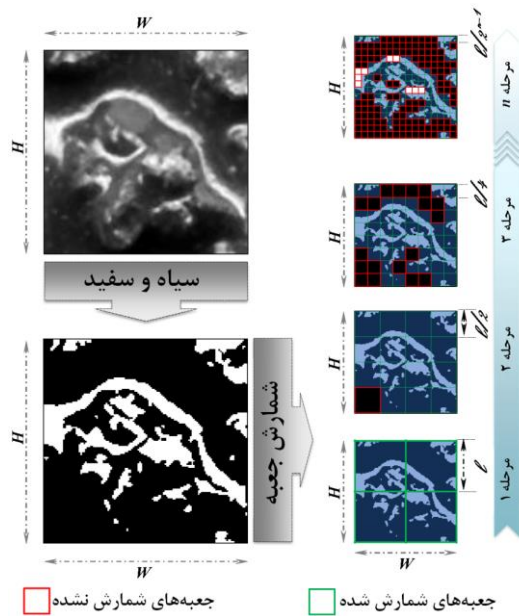
$$\psi_{j,m,n}^D(x, y) = 2^{\frac{j}{2}} \psi^D(2^j x - m, 2^j y - n) = 2^{\frac{j}{2}} \psi(2^j x - m) \psi(2^j y - n) \quad (10)$$

با استفاده از رابطه‌های ۷-۱۰ انتقال موجک گسسته یک تصویر به صورت رابطه‌های ۱۱-۱۴ بیان می‌شود [۱۰].

¹ Dyadic



شکل ۳- مراحل تجزیه تصویر توسط تبدیل موجک [۱۱].



شکل ۴- نحوه محاسبه بُعد فرکتال به روش شمارش جعبه [۱۳].

۲-۲-۱-۲-۲ روش شمارش جعبه تفاضلی^۴

رویه^۵ شدت روشنایی پیکسل‌های تصویر، با رسم شدت روشنایی هر پیکسل در مقابل مختصات هر پیکسل در دستگاه مختصات دکارتی سه بُعدی به دست می‌آید. در شکل ۵ این رویه‌ها برای تصاویر میکروسکوپ نوری گرفته شده از کدو حلوائی و شکلات با بزرگ نمایی ۱۰ برابر، نمایش داده شده است [۱۵]. پنتلند^۶ در پژوهش خود نشان داد در صورتی که از یک سطح فرکتالی واقعی تصویر تهیه شود، رویه‌ی به دست آمده از آن تصویر نیز فرکتالی بوده و دارای بُعد فرکتالی برابر با بُعد فرکتالی سطح واقعی خواهد بود [۱۶].

$$\left[\frac{M}{S}\right] = \left[\frac{G}{S'}\right] \quad (16)$$

G: اختلاف کل سطوح روشنایی تصویر اولیه

- حال قسمت $S \times S$ پیکسل (i, j) ام را در نظر بگیرید، اگر کمترین سطح روشنایی پیکسل‌های موجود در این قسمت، در جعبه ام قرار بگیرد و بیشترین سطح روشنایی پیکسل‌های موجود در این قسمت، در جعبه k ام قرار بگیرد آنگاه n_r طبق رابطه ۱۷ محاسبه خواهد شد. مجموع $n(r)$ ‌های تمام قسمت‌های $S \times S$ پیکسل موجود در تصویر $N(r)$ نامیده می‌شود (رابطه ۱۸).

$$\rightarrow N(r) = \sum_{i,j} n_r(i, j) \quad (17)$$

$$n(r) = k - 1 + 1 \quad (18)$$

۲-۲-۲ روش‌های مبتنی بر مدل

۱-۲-۲-۲ بُعد فرکتال

مدل فرکتالی ابزاری کارآمد برای مطالعه‌ی اجسام و بافتارهای نامنظم طبیعی است [۱۲]. ویژگی کلیدی در مطالعه‌ی یک شکل نامنظم با استفاده از مدل فرکتالی، بُعد فرکتال است. به طور مفهومی، بُعد فرکتال عددی است که بیانگر پیچیدگی و بی‌نظمی یک جسم است. بر خلاف بُعد اقلیدسی یک شکل هندسی که یک عدد صحیح است، بُعد فرکتال یک شکل نامنظم عددی کسری است. هرچه این عدد مقداری بزرگتر باشد نشانده‌ی پیچیدگی و عدم نظم شکل یا بافتار مدنظر است [۱۳، ۱۴]. از دیدگاه ریاضی (نظریه مجموعه‌ها)، بُعد فرکتال یک شکل نامنظم را می‌توان به صورت زیر تعریف نمود: مجموعه‌ی نامنظم A را در R^n را در نظر بگیرید. رابطه‌ی کلی بُعد فرکتال مجموعه A به صورت رابطه ۱۵ بیان می‌شود.

$$\text{Fractal dimension} = \frac{\log N(r)}{\log(1/r)} \quad (15)$$

در این رابطه $N(r)$ حداقل تعداد مجموعه‌هایی به شعاع r است که برای پوشش دادن کامل مجموعه A نیاز است [۱۳، ۱۴]. روش‌های مختلفی برای تعریف و محاسبه $N(r)$ وجود دارد. در روش توصیف کمی بافتار با استفاده از مدل فرکتالی از انواع تصاویر رقومی نظیر تصاویر سیاه و سفید^۱، تصاویر خاکستری^۲ و تصاویر انتقال یافته توسط تبدیل‌های ریاضی می‌توان استفاده نمود که در ادامه به برخی از آنها پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱-۱-۲-۲ روش شمارش جعبه^۳

در روش شمارش جعبه در اولین قدم، تصویر با استفاده از روش‌های مختلف به تصویر سیاه و سفید تبدیل می‌شود (شکل ۴). در قدم بعدی، حداقل تعداد جعبه‌های لازم (N) با یک طول ضلع مشخص (l) که برای پوشاندن نواحی سیاه و سفید لازم است محاسبه می‌شود. در مرحله بعدی طول ضلع جعبه نصف شده و دوباره کمترین تعداد جعبه‌های لازم به طریق ذکر شده محاسبه می‌گردد. این مراحل آنقدر تکرار می‌شود تا طول ضلع جعبه به دو پیکسل برسد (مرحله n در شکل ۴). در آخر، بُعد فرکتال تصویر از شیب بهترین خط برازش شده بر داده‌های تعداد جعبه‌ها (N) در مقابل معکوس طول جعبه‌ها ($1/r$) در مختصات لگاریتمی تقریب زده می‌شود [۱۳].

¹ Binary

² Gray scale

³ Box counting

⁴ Differential box counting

⁵ Surface

⁶ Pentland

$$\text{Fractal dimension} = \frac{\log N(r)}{\log \frac{1}{r}} + 3 \quad (19)$$

N میانگین اختلاف روشنایی پیکسل‌های موجود در تصویر با چهار پیکسل مجاور خود در یک تصویر است (شکل ۷) و از رابطه ۲۰ قابل محاسبه است.

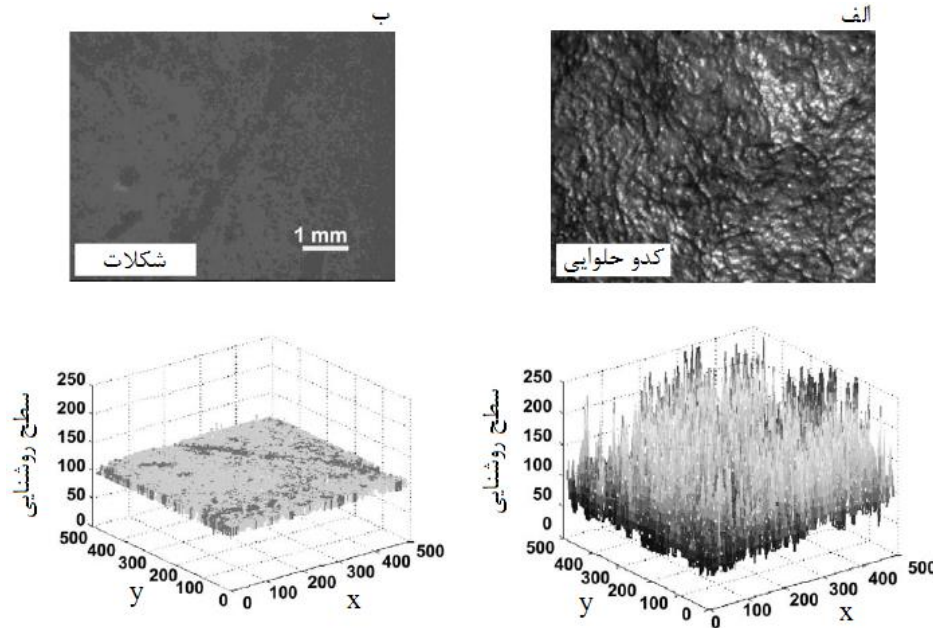
$$N(r) = \frac{\sum_{i \times j} |I(i,j) - I(i+r,j)| + |I(i,j) - I(i-r,j)| + |I(i,j) - I(i,j+r)| + |I(i,j) - I(i,j-r)|}{i \times j} \quad (20)$$

با تغییر اندازه S در هر مرحله و محاسبه N(r) و رسم خط $\log N(r)$ بر حسب $\log 1/r$ بُعد فرکتال سطح تصویر به صورت شیب خط حاصل به دست خواهد آمد.

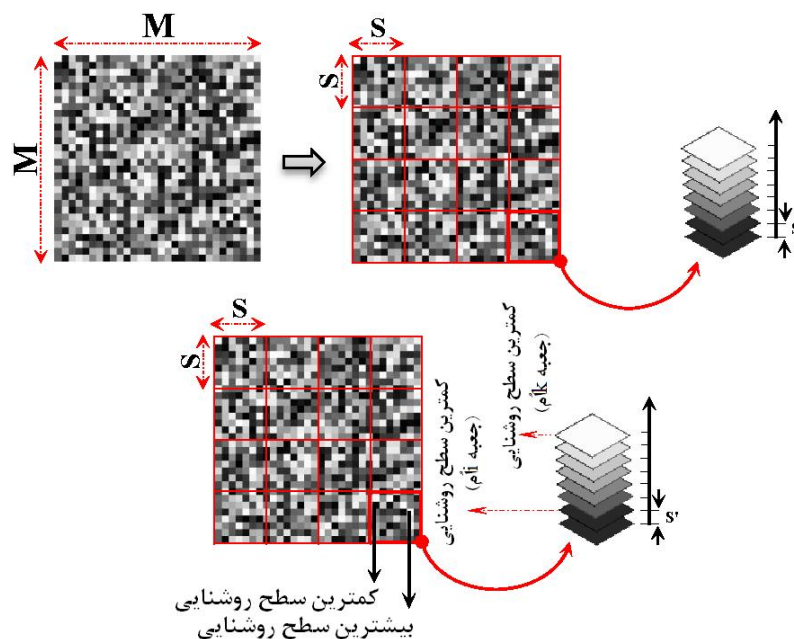
۲-۱-۳- روش حرکت براونی فرکتالی تفاضلی^۱

در روش حرکت براونی فرکتالی تفاضلی بُعد فرکتال تصویر با استفاده از رابطه ۱۹ محاسبه می‌گردد [۱۷].

^۱ Differential fractal Brownian motion



شکل ۵- رویه‌ی تصاویر رقومی: الف) تصویر میکروسکوپ نوری کدو حلوايي با بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر به همراه رویه‌ی آن و ب) تصویر میکروسکوپ نوری شکلات با بزرگ‌نمایی ۱۰ برابر به همراه رویه‌ی آن [۱۵].



شکل ۶- نحوه محاسبه‌ی بُعد فرکتال به روش شمارش جعبه تفاضلی.

شیب بهترین خط برازش شده بر داده‌های F_V یا F_H در مقابل معکوس طول فرکانس ($1/f$) در مختصات لگاریتمی تقریب زده می‌شود.

۳- مروری بر کاربردهای پردازش بافتار تصویر در صنایع غذایی

۳-۱- روش‌های مبتنی بر تبدیل^۳

با وجود اینکه روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی نسبت به روش‌های آماری از محبوبیت کمتری برخوردارند، اما کاربردهای زیادی در صنایع غذایی از جمله کنترل کیفیت گوشت، میوه‌جات و سبزیجات برای آنها گزارش شده است. تحقیقات گذشته در ارتباط با بکارگیری روش‌های مبتنی بر تبدیل در کمی سازی بافتار تصویر در جدول ۱ گزارش شده است. مطابق اطلاعات ذکر شده در این جدول، روش ماسک پیچش بیشترین مورد استفاده را در بین روش‌های ذکر شده بر مبنای تبدیل‌های ریاضی دارد. این موضوع می‌تواند به کمتر بودن حجم محاسبات جهت استخراج ویژگی‌های بافتار تصویر با این روش در مقایسه با روش‌های تبدیل فوریه و تبدیل موجک نسبت داده شود. بهاراتی^۴ و همکاران در پژوهش خود نشان دادند که در بین روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی، روش تبدیل موجک بهترین عملکرد را دارا است [۵]. به عنوان نمونه می‌توان به عملکرد دقیق تبدیل موجک در تعیین خواص فیزیکی و شیمیایی گوشت گاو با استفاده از بافتار تصویر اشاره نمود [۹]. در جدول ۱ به یک مورد از کاربرد تبدیل فوریه برای بررسی کیفیت شکلات اشاره شده است. در این مورد، تبدیل فوریه به همراه ویژگی‌های رنگی تصویر به کار گرفته شده است [۶].

در این رابطه $I(i, j)$ شدت روشنایی پیکسل هدف را نشان می‌دهد و r فاصله پیکسل هدف تا چهار همسایه خود را نشان می‌دهد (شکل ۷). مطابق این رابطه، اختلاف روشنایی تمام پیکسل‌ها با چهار پیکسل همسایه خود که در فاصله r از آن قرار دارد محاسبه شده و با تقسیم این مقدار بر کل تعداد پیکسل‌ها میانگینی از اختلاف روشنایی پیکسل‌های موجود در تصویر به دست می‌آید. با تغییر مقدار r در هر مرحله و محاسبه $N(r)$ و رسم خط $N(r)$ در مقابل $1/r$ در مختصات لگاریتمی، بُعد فرکتال تصویر تقریب زده می‌شود.

۲-۱-۲-۴- روش حوزه فرکانس

محاسبه بُعد فرکتال با استفاده از تصاویر انتقال یافته توسط تبدیل‌های ریاضی نیز امکان پذیر بوده و مورد توجه پژوهشگران حوزه پردازش تصویر قرار گرفته است. چان^۱ در پژوهش خود نشان داد که بُعد فرکتال یک تصویر را می‌توان مطابق رابطه‌های ۲۱ و ۲۲ با استفاده از تصویر انتقال یافته توسط تبدیل فوریه محاسبه نمود [۱۷].

$$\text{Fractal dimension} = \frac{\log F_H(f)}{2 \log \frac{1}{f}} + 2 \quad (21)$$

$$\text{Fractal dimension} = \frac{\log F_V(f)}{2 \log \frac{1}{f}} + 2 \quad (22)$$

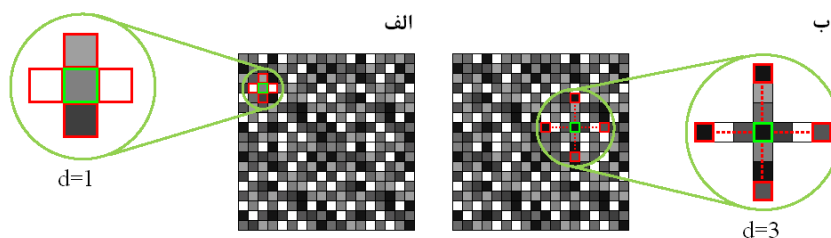
در این روابط، F_V و F_H به ترتیب میانگین افقی و عمودی طیف توان^۲ تبدیل فوریه تصویر هستند. f نشان‌دهنده فرکانس می‌باشد. بُعد فرکتال تصویر از

³ Transform-based methods

⁴ Bharati

¹ Chan

² Power spectrum



شکل ۷- نحوه محاسبه $N(r)$ برای پیکسل‌های موجود در یک تصویر به روش حرکت براونی. الف) همسایگی به فاصله یک پیکسل. ب) همسایگی به فاصله سه پیکسل [۱۳].

جدول ۱- کاربردهای روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی در نظارت و کنترل کیفیت محصولات غذایی.

کاربرد	دقت	نوع تبدیل به کار رفته
تعیین خواص فیزیکی گوشت گاو [۹]	۰/۹۱	موجک
تعیین خواص شیمیایی گوشت گاو [۹]	۰/۸۸۲	موجک
ارزیابی کیفیت شکلات (با کمک ویژگی‌های رنگی) [۶]	۰/۹۷۸	فوریه
پیش بینی سختی ادراکی محصولات غذایی حجیم و پُف‌دار [۱۸]	۰/۹۰۳	ماسک پیچش
تعیین اندازه حفره‌های خالی موجود در توده‌ی محصولات غذایی حجیم و پُف‌دار [۱۹]	۰/۷۵۲	ماسک پیچش
دسته‌بندی بادام زمینی نارس [۲۰]	۰/۳۴۷	ماسک پیچش
دسته‌بندی بادام زمینی رسیده [۲۰]	۰/۳۴۷	ماسک پیچش
پیش بینی خواص ادراکی گوشت خوک [۲۱]	۰/۷۰۷	ماسک پیچش
پیش‌بینی بافتار خوارکی سیب زمینی پخته شده [۲۲]	۰/۴۹۸	ماسک پیچش

۳-۲- روش‌های مبتنی بر مُدل

کاربرد روش‌های مبتنی بر مدل، جهت کمی‌سازی بافتار در صنایع غذایی بسیار محدود است. به عنوان نمونه می‌توان از کاربرد بُعد فرکتال جهت ارزیابی کیفیت گوشت گاو نام برد [۲۳]. بررسی معیارهای کیفیت گوشت خوک با استفاده از بُعد فرکتال از دیگر مثال‌های کاربرد روش‌های مبتنی بر مُدل در صنایع غذایی است که توسط برگ^۱ و همکارانش صورت پذیرفت [۲۴]. در پژوهشی دیگر، تیبو^۲ و همکارانش بافتار خوارکی سیب زمینی پخته شده را با استفاده از روش خودهمبستگی پیش‌بینی نمودند [۲۲]. با وجود اینکه به طور کلی دقت عملکرد روش‌های مبتنی بر مدل کمتر از روش‌های آماری است، اما در برخی موارد می‌توان از اطلاعات حاصل از این روش‌ها به عنوان داده‌های مکمل روش‌های آماری استفاده نمود. در این ارتباط می‌توان به پژوهش برگ و همکارانش اشاره نمود. در این پژوهش اطلاعات ماتریس هم‌وقوعی به تنهایی قادر به ارزیابی کیفیت گوشت خوک با دقت مناسب نبوده است [۲۴]. کاربرد اطلاعات به‌دست آمده از روش بُعد فرکتال به عنوان داده‌های مکمل به طور قابل توجهی دقت عملکرد کنترل کیفیت را بالا برده است.

۴- مقایسه روش‌های مختلف ارزیابی کمی بافتار تصویر

مقایسه‌ای از کاربردهای روش‌های مختلف ارزیابی بافتار تصویر در صنایع غذایی در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به جدول ۲ می‌توان مشاهده کرد که

روش‌های آماری ارزیابی بافتار تصویر پراستفاده‌ترین شیوه در کنترل کیفیت و نظارت بر محصولات غذایی محسوب می‌شوند. به طور کلی ۷۵٪ از کل کاربردهای مربوط به بکارگیری بافتار تصویر در ارزیابی محصولات غذایی مربوط به روش‌های آماری می‌شود [۲]. روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی از نظر محبوبیت در جایگاه دوم قرار می‌گیرند، این در حالی است که روش‌های مبتنی بر مدل، کاربرد محدودتری از دو روش دیگر داشته و در جایگاه آخر قرار دارند. محبوبیت روش‌های آماری را می‌توان به تعداد بالای عوامل مستخرج از آنها نسبت داد. همانطور که اشاره شد، در بررسی بافتار تصویر محصولات خوراکی، احتمال اینکه حداقل یکی از این عوامل استخراج شده از تصاویر تمایز بین آنها را به خوبی نشان دهد بالا خواهد بود [۱۴، ۱۳]. برای به‌دست آوردن معیارهای کمی توصیفگر بافتار از تصاویر انتقال یافته توسط تبدیل‌های ریاضی نیاز به دانستن دانش پردازش سیگنال‌ها است. به همین دلیل موارد استفاده از روش‌های مبتنی بر تبدیل‌های ریاضی نسبت به روش‌های آماری کمتر است، چرا که تعداد محققین آشنا به دانش پردازش سیگنال محدود است [۴]. موارد استفاده از روش‌های مبتنی بر مُدل در صنایع غذایی نادر است. روش خودهمبستگی زمان محاسبات زیادی نیاز دارد و این نقص به عنوان یکی از دلایل محدود بودن استفاده از آن به شمار می‌رود [۲۵]. روش بُعد فرکتال در مقایسه با دیگر روش‌های ذکر شده برای توصیف کمی بافتار، روشی نوین‌تر است و عملکردی مناسب در توصیف بی‌نظمی‌ها و ناهمواری‌های موجود در سطح مواد دارد [۱۴، ۱۳]. از این روی می‌توان انتظار داشت که در آینده توجه بیشتری به این روش شده و کاربردهای بیشتری از آن در صنایع غذایی یافت شود.

¹ Berg
² Thybo

جدول ۲- فهرستی از کاربردهای روش‌های مختلف ارزیابی بافتار تصویر در صنایع غذایی.

مرجع	روش‌های مبتنی بر مدل		روش‌های مبتنی بر تبدیل			روش‌های آماری			محصول غذایی
	خ ه ^۸	ب ف ^۷	ت م ^۶	ت ف ^۵	م پ ^۴	م و س ر ه ^۳	م ط پ پ ^۲	م ه و ^۱	
[۲۶]								✓	سیب
[۲۷]								✓	پرتقال
[۲۲]	✓								سیب زمینی پخته شده
[۲۸]					✓				نان و محصولات نانویی
[۲۹]								✓	
[۳۰]							✓	✓	گوشت گاو
[۳۱]								✓	
[۹]			✓					✓	
[۳۲]								✓	
[۳۳]							✓	✓	
[۲۳]		✓		✓		✓	✓	✓	
[۳۴]							✓	✓	شکلات
[۶]				✓					
[۱۹]					✓			✓	محصولات غذایی حجیم و پُف‌دار مانند نان و بیسکویت
[۳۵]					✓			✓	
[۳۶]							✓		

ادامه جدول ۲

مرجع	روش‌های مبتنی بر مدل		روش‌های مبتنی بر تبدیل			روش‌های آماری			محصول غذایی
	خ ^ه	ب ^ف	ت ^م	ت ^ف	م ^پ	م ^و	س ^ر	ه ^م	
[۱۸]					✓			✓	
[۳۷]								✓	✓
[۳۸]								✓	✓
[۳۹]								✓	✓
[۴۰]								✓	
[۲۰]					✓				
[۲۴]		✓							✓
[۲۱]		✓	✓		✓	✓		✓	✓

۱. ماتریس هم-وقوعی، ۲. ماتریس طول پیمایش پیکسل، ۳. ماتریس وابستگی سطح روشنایی همسایه، ۴. ماسک پیچش، ۵. تبدیل فوری، ۶. تبدیل موجک، ۷. بُعد فرکتال و ۸. خودهمبستگی

بدون دخالت آزمونگر انسانی فراهم شده است. ماهیت غیرمخرب و انعطاف‌پذیری کاربردی در کنار قدرت و سرعت بالای محاسبه رایانه‌های امروزی، جذابیت کاربرد روش بینایی ماشین را در کنترل برخط کیفیت محصولات غذایی برای تولیدکنندگان بیش از پیش نموده است. پردازش تصویر به عنوان اصلی‌ترین بخش یک سیستم بینایی ماشین در نظر گرفته می‌شود. استخراج عواملی هرچه مفیدتر و در بردارنده‌ی اطلاعات کامل‌تر در این بخش، عملکرد مناسب سیستم بینایی ماشین را تضمین می‌نماید. بافتار به عنوان یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های تصویر قلم داد می‌شود و استفاده از آن در ارزیابی و نظارت بر محصولات غذایی بسیار مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. به طور کلی روش‌های ارزیابی کمی بافتار تصویر مورد استفاده در صنایع غذایی را می‌توان به سه دسته‌ی روش‌های آماری، روش‌های مبتنی بر تبدیل و روش‌های مبتنی بر مدل طبقه‌بندی نمود. در بخش اول این پژوهش روش‌های آماری پردازش بافتار به تفصیل مورد بررسی قرار گرفتند. در این مقاله روش‌های مبتنی بر مدل و تبدیل‌های ریاضی در پردازش بافتار مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج پژوهش‌های گذشته نشان می‌دهد که نتایج حاصل از پردازش بافتار تصاویر دارای عملکردی قابل قبول در ارزیابی کیفیت محصولات غذایی هستند. باید توجه داشت، برخلاف اینکه عموماً دقت عملکرد روش‌های آماری در ارزیابی کیفیت محصولات غذایی بالاتر از سایر روش‌ها است اما دقت عملکرد یک روش در کاربردهای مختلف یکسان نخواهد بود. بنابراین امکان تشخیص اینکه کدام روش برای کاربرد در ارزیابی یک محصول غذایی مشخص بهترین عملکرد را خواهد داشت به سادگی امکان‌پذیر نیست. بنابراین توصیه می‌شود که جهت دستیابی به رابطه‌ای با قابلیت اطمینان بیشتر بین نتایج بافتار تصویر و خواص و ویژگی‌های محصولات غذایی از چند روش مختلف برای پردازش بافتار استفاده شود.

همانطور که اشاره شده، علیرغم تعدد روش‌های ارائه شده جهت توصیف کمی بافتار تصویر هنوز تعریف دقیق و واحدی از بافتار وجود ندارد. ویژگی‌های مختلف، نظیر روشنایی، دانه دانه بودن، ناهموازی، بی‌نظمی، جهت‌گیری، ریزی و درشتی اولیه‌های موجود در تصاویر را اندازه‌گیری می‌نمایند. بنابراین پیش‌بینی اینکه کدام روش ارزیابی و کدام کمیّت بافتار تصویر مفیدترین اطلاعات را برای ارزیابی و نظارت بر کیفیت یک نوع محصول غذایی مشخص دارد امری بسیار دشوار است [۲۲]. به عنوان مثال، با وجود اینکه روش‌های آماری در اکثر کاربردها نسبت به سایر روش‌های توصیف بافتار عملکرد دقیق‌تری داشته‌اند اما برای ارزیابی کیفیت ادراکی گوشت خوک ناموفق بوده‌اند [۲۱]. در عوض روش ماسک پیچش در این مورد دقت عملکردی حدود ۸۳٪ داشته است [۲۱]. اطلاعات به‌دست آمده از تبدیل موجک در ارزیابی کیفیت گوشت گاو عملکردی به مراتب بهتر از ماتریس هم‌وقوعی داشته است. به طوری که دقت عملکرد روش تبدیل موجک بیش از ۹۰٪ به‌دست آمده در صورتی که عملکرد روش ماتریس هم‌وقوعی کمتر از ۶۰٪ حاصل شده است [۹]. روش مبتنی بر مدل خودهمبستگی با عملکردی با دقت ۶۷٪ در مقابل روش ماتریس طول پیمایش پیکسل با عملکردی با دقت ۲۵٪ در پیش‌بینی بافتار خوراکی سیب زمینی پخته شده بسیار موفق‌تر ظاهر شده است [۲۲]. با توجه به مثال‌های ذکر شده، برای دستیابی به رابطه‌ای دقیق مابین ویژگی‌های بافتار تصویر و کیفیت محصولات غذایی مختلف توصیه می‌شود از روش‌های متنوع جهت استخراج ویژگی‌های کمی بافتار تصویر استفاده شود [۱۴، ۱۳].

۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از سیستم‌های بینایی ماشین امکان کنترل کیفیت و نظارت بر انواع و اقسام محصولات غذایی به صورت مکانیزه، سریع، بهداشتی و

۱. س قدرتی، م محسنی، س گرچی کندی، "مروری بر کاربردهای روش‌های پردازش تصویر بر کنترل کیفیت محصولات غذایی-بخش اول: روش‌های آماری پردازش بافتار"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۶، شماره ۳، ۶۵-۷۷، ۱۳۹۵.
2. C. Zheng, D.-W. Sun, L. Zheng, "Recent applications of image texture for evaluation of food qualities-a review", Trends Food Sci. Technol., 17, 113-128, 2006.
3. D. Patel, E. R. Davies, I. Hnnah, "The use of convolution operators for detecting contaminants in food images", Pattern Recognit., 29, 1019-1029, 1996.
4. J. C. Russ, F. Brent Neal, "The image processing handbook", 7th ed., North Carolina, USA, CRC press, 2015.
5. M. H. Bharati, J. J. Liu, J. F. MacGregor, "Image texture analysis: methods and comparisons", Chemom. Intell. Lab. Syst., 72, 57-71, 2004.
6. V. Briones, J. M. Aguilera, "Image analysis of changes in surface color of chocolate", Food Res. Int., 38, 87-94, 2005.
7. M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle, "Image processing, analysis, and machine vision", 4th ed., USA, Cengage Learning, 2014.
8. R. C. Gonzalez, R. E. Woods, "Digital image processing", 3rd ed., USA, Pearson, 2007.
9. Y. Huang, R. E. Lacey, L. L. Moore, R. K. Miller, A. D. Whittaker, J. Ophir, "Wavelet textural features from ultrasonic elastograms for meat quality", Trans. ASAE, 40, 1741-1748, 1997.
10. S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation", Pattern Anal. Mach. Intell. IEEE Trans. On, 11, 674-693, 1989.
11. G. Artigues, J. Portell, A. G. Villafraña, H. Ahmadloo, E. García-Berro, "Discrete wavelet transform fully adaptive prediction error coder: image data compression based on CCSDS 122.0 and fully adaptive prediction error coder", J. Appl. Remote Sens., 7, 74592-74592, 2013.
12. B. B. Mandelbrot, "The fractal geometry of nature", USA, Macmillan, 1983.
13. S. Ghodrati, "Investigation of the image processing methods for surface fractal dimension calculation and its relation with surface roughness and organic coatings adhesion", Master, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2016.
۱۴. س قدرتی، م محسنی، س گرچی کندی، "رابطه چسبندگی و بعد فرکتالی سطح"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، جلد ۵، شماره ۲، ۱۷-۳، ۱۳۹۴.
15. M. R. Schroeder, "Fractals, chaos, power laws: Minutes from an infinite paradise", USA, Courier Corporation, 2012.
16. R. Quevedo, L.-G. Carlos, J. M. Aguilera, L. Cadoche, "Description of food surfaces and microstructural changes using fractal image texture analysis", J. Food Eng., 53, 361-371, 2002.
17. A. P. Pentland, "Fractal-based description of natural scenes", Pattern Anal. Mach. Intell. IEEE Trans. On, 6, 661-674, 1984.
18. K. L. Chan, "Quantitative characterization of electron micrograph image using fractal feature", Biomed. Eng. IEEE Trans. On, 42, 1033-1037, 1995.
19. X. Gao, J. Tan, P. Shatadal, H. Heymann, "Evaluating expanded-food sensory properties by image analysis", J. Texture Stud., 30, 291-304, 1999.
20. X. Gao, J. Tan, "Analysis of expanded-food texture by image processing part I: geometric properties", J. Food Process Eng., 19, 425-444, 1996.
21. S. R. Gbate, M. D. Evans, C. K. Kvien, K. S. Rucker, "Maturity detection in peanuts (Arachis hypogaea L) using machine vision", Trans. ASAE, 36, 1941-1947, 1993.
22. E. Cernadas, P. Carrión, P. G. Rodríguez, E. Muriel, T. Antequera, "Analyzing magnetic resonance images of Iberian pork loin to predict its sensorial characteristics", Comput. Vis. Image Underst., 98, 344-360, 2005.
23. A. K. Thybo, P. M. Szczypiński, A. H. Karlsson, S. Dønstrup, H. S. Stødkilde-Jørgensen, H. J. Andersen, "Prediction of sensory texture quality attributes of cooked potatoes by NMR-imaging (MRI) of raw potatoes in combination with different image analysis methods", J. Food Eng., 61, 91-100, 2004.
24. O. Basset, B. Buquet, S. Abouelkaram, P. Delachartre, J. Culioli, "Application of texture image analysis for the classification of bovine meat", Food Chem., 69, 437-445, 2000.
25. E. P. Berg, F. Kallel, F. Hussain, R. K. Miller, J. Ophir, N. Kehtarnavaz, "The use of elastography to measure quality characteristics of pork semimembranosus muscle", Meat Sci., 53, 31-35, 1999.
26. R. M. Haralick, "Statistical and structural approaches to texture", Proc. IEEE, 67, 786-804, 1979.
27. I. Kavdir, D. E. Guyer, "Apple sorting using artificial neural networks and spectral imaging", Trans. ASAE, 45, 1995-2005, 2002.
28. N. Kondo, U. Ahmad, M. Monta, H. Murase, "Machine vision based quality evaluation of Iyokan orange fruit using neural networks", Comput. Electron. Agric., 29, 135-147, 2000.
29. D. Bertrand, C. Le Guerneve, D. Marion, M. F. Devaux, P. Robert, "Description of the textural appearance of bread crumb by video image analysis", Cereal Chem., 69, 257-261, 1992.
30. D. D. Day, D. Rogers, "Fourier-based texture measures with application to the analysis of the cell structure of baked products", Digit. Signal Process, 6, 138-144, 1996.
31. V. R. Amin, R. Roberts, G. Rouse, "Tissue characterization for beef grading using texture analysis of ultrasonic images", Ultrasonics Symposium, 1993. Proceedings, IEEE 1993, 969-972, 1993.
32. H. L. Zhang, D. E. Wilson, G. H. Rouse, "Frequency and intensity texture analysis for beef quality evaluation and prediction from ultrasound images", Engineering in Medicine and Biology Society, 1994. Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE, 668-669, 1994.
33. K. Shiranita, T. Miyajima, R. Takiyama, "Determination of meat quality by texture analysis", Pattern Recognit. Lett., 19, 1319-1324, 1998.
34. J. Li, J. Tan, F. A. Martz, H. Heymann, "Image texture features as indicators of beef tenderness", Meat Sci., 53, 17-22, 1999.
35. J. Li, J. Tan, P. Shatadal, "Classification of tough and tender beef by image texture analysis", Meat Sci., 57, 341-346, 2001.
36. X. Gao, J. Tan, "Analysis of expanded-food texture by image processing part II: mechanical properties", J. Food Process Eng., 19, 445-456, 1996.
37. J. Tan, H. Zhang, X. Gao, "SEM image processing for food structure analysis", J. Texture Stud., 28, 657-672, 1997.
38. S. Majumdar, D. S. Jayas, "Classification of cereal grains using machine vision: III. Texture models", Trans. ASAE, 43, 1681-1687, 2000.
39. J. Paliwal, N. S. Visen, D. S. Jayas, N. D. G. White, "Cereal grain and dockage identification using machine vision", Biosyst. Eng., 85, 51-57, 2003.

40. J. Paliwal, N. S. Visen, D. S. Jayas, N. D. G. White, "Comparison of a neural network and a non-parametric classifier for grain kernel identification", *Biosyst. Eng.*, 85, 405-413, **2003**.
41. A. Fardet, P. M. Baldwin, D. Bertrand, B. Bouchet, D. J. Gallant, J.-L. Barry, "Textural images analysis of pasta protein networks to determine influence of technological processes", *Cereal Chem.*, 75, 699-704, **1998**.