

تشخیص تعداد و حجم حباب محلول در یک راکتور زیستی به کمک بینایی ماشین

علیرضا رضائی*

گروه مهندسی مکترونیک، بخش مکترونیک و ریز فناوری، دانشکده سامانه های هوشمند، دانشکده گان علوم و فناوریهای میان رشته ای، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده: هدف از این مقاله طراحی یک راکتور زیستی یا فرمانتور مجهز به تکنولوژی پردازش تصویر به صورت بلادرنگ با امکان بررسی حجم و تعداد حباب های موجود در ظرف راکتور زیستی می باشد تا امکان کنترل لحظه ای و دقیق به منظور رشد میکروارگانیسم ها را فراهم می نماید. در راکتور زیستی یاد شده شرایط بهینه ای برای رشد میکروارگانیسم ها مانند قارچ و باکتری و مخمر فراهم شده و کشت سلول های جانوری و گیاهی در آن به راحتی انجام می شود. استفاده از این راکتور زیستی به میکروارگانیسم ها این امکان را می دهد که پیش از انتقال به مرحله تولید بیش از ده نسل رشد کنند. علاوه بر کنترل حجم حباب های هوا، پارامترهای دما، CO_2 ، دور موتور، مقدار اکسیژن و pH و پارامترهای دیگر نیز مدام در حال کنترل شدن است. در راکتورهای زیستی اندازه گیری حباب های ایجاد شده در ظرف دارای اهمیت فراوانی است این اهمیت از این جهت دیده می شود که سبب ایجاد نسل های گوناگونی از سلول ها در راکتور زیستی می شود، زیرا حباب های ایجاد شده وظیفه رساندن اکسیژن به میکروارگانیسم های موجود و نیز هم زدن محیط و همگن سازی آن را برعهده دارند که این امر موجبات رشد و تکثیر مناسب میکروارگانیسم ها را فراهم می کند. در مدل های همانند پیشین امکان اندازه گیری مقدار هوای موجود در ظرف و کنترل همگن بودن محیط در لحظه وجود نداشته که این ضعف به کمک این شیوه بر طرف می شود. در این مقاله در گام اول به کمک دوربین تصویرهای لحظه به لحظه به عنوان داده ورودی ضبط شده در گام پسین تصویرها پردازش شده و در گام آخر تصویرهای پردازش شده به کمک شبکه های عصبی به عنوان خروجی ایجاد می شود. حجم و مقدار و نسبت پراکندگی حباب ها در ظرف و نتیجه های شبیه سازی کارایی روش پیشنهادی را نشان می دهد.

واژگان کلیدی: راکتور زیستی، شبکه عصبی، دوربین، اسپاژر، حباب، اکسیژن.

KEYWORDS: Bioreactor, neural network, camera, spaghetti, bubble, oxygen

مقدمه

زیستی و فرمانتور پارامترهایی از جمله دما، کربن دی اکسید، دور موتور، کنترل پمپ پرستالیتیک و اندازه گیری و کنترل حجم حباب مواردی هستند که باید لحظه به لحظه تحت کنترل قرار بگیرند

با توجه به نیاز امروز برای تولید پروتئین و تولید قارچ و کشت سلول نیاز به داشتن دستگاهی که بتواند محیط مناسبی را برای انجام این پروسه فراهم نماید روز به روز افزایش می یابد. در راکتور

* عهده دار مکاتبات

+Email: arrezade@ut.ac.ir

پردازش تصویر لحظه به لحظه‌ای هوشمند امکان کنترل همگن‌سازی و اکسیژن‌رسانی را فراهم می‌نماید [۸]. ادامه مقاله به بخش‌های زیر تقسیم می‌شود در بخش دوم به پیشینه کار پرداخته شده در بخش سوم الگوریتم ارائه شده بررسی شده و در بخش چهارم نتیجه‌ها و در بخش آخر به جمع‌بندی کار پرداخته می‌شود.

پیشینه پژوهش

استفاده از ماشین بینایی برای تعیین حجم اشیاء از جمله فراورده‌های کشاورزی به دلیل غیر مخرب بودن مورد توجه است. در این مقاله به دلیل نزدیکی و شباهت حباب با اشکال میوه و تشخیص حجم آن‌ها، این رویکرد مورد توجه قرار گرفته شده است و دنباله‌ای از کار پژوهشگران در این حیطه، مبنای این کار پژوهشی قرار داده شده است [۹-۱۵].

یک الگوریتم ماشین بینایی با استفاده از شبکه عصبی توسط فربرز و تاترزفیلد برای تعیین حجم گلابی با استفاده از دو عدد تصویر دیجیتال به کار برده شده که RMS خطا با استفاده از یک تصویر دیجیتال ۳٪ بوده که با قرارگیری چهار تصویر این خطا به ۱/۹٪ کاهش داده شده است. لرستانی و همکاران یک سامانه درجه‌بندی براساس منطق فازی برای درجه‌بندی سیب ارائه داده‌اند. ویژگی‌هایی مانند رنگ و اندازه و ... به روش یک سیستم شامل سورتور سیب. محفظه نور پردازشی دوربین و یک کامپیوتر محاسبه شده است. نتیجه‌های درجه بندی به دست آمده توافق ۹۱/۲٪ و ۹۵/۲٪ را به ترتیب در حالت‌های off line-on line نشان می‌دهند [۱۶].

هان و سانچز الگوریتم تصویری را برای محاسبه حجم فراورده‌های کشاورزی غیرمدور مانند هویج ارائه دادند [۱۷]. سابلو و همکاران الگوریتم پردازش تصویری را برای تعیین تصویر سطح و حجم فراورده‌های کشاورزی دارای محور تقارن استفاده کرده‌اند [۱۸]. ونگانگ با استفاده از روش سابلو و همکاران یک سنسور ارزان قیمت را برای اندازه‌گیری تصویر سطح و حجم فراورده‌های کشاورزی طراحی کرد. او با فرض این که شی قرار گرفته به شکل استوانه‌ای می‌باشد. ارتفاع آن را یک پیکسل فرض کرده و حجم هر جز را محاسبه کرده و حجم کل را با جمع کردن استوانه‌های منفرد به دست آوردند [۱۹]. این پژوهشگران گزارش دادند که این روش حجم سطح و تصویر لیمو، هلو و گوجه فرنگی را به طور موفقیت آمیزی تخمین زده است. بیللی و همکاران سامانه پردازش تصویری ارائه دادند که جرم فراورده‌های کشاورزی را سریع و دقیق به دست می‌آوردند [۲۰]. بولنت کک حجم هندوانه را با دو روش

[۱]. راکتور زیستی دستگاهی است که از آن برای انجام یک یا چند واکنش بیوشیمیایی در برای تبدیل مواد خام یا سوبسترا به فراورده استفاده می‌شود. این تبدیل به روش عمل یک بیوکاتالیست، آنزیم، میکروارگانیسم، سلول‌های حیوانات و گیاهان و یا ساختارهای سلولی مانند کلروپلاست و میتوکندری صورت می‌گیرد [۲]. راکتورها می‌توانند برای تولید انبوه مواد شیمیایی، دارویی و مواد پتروشیمی و در واحدهای صنعتی بزرگ به کار گرفته شوند و یا برای انجام مطالعه‌ها و پژوهش‌ها و در اندازه‌های کوچک به کار بروند [۳]. طراحی راکتورها با توجه به سازوکار واکنش و همچنین نوع واکنش و فاز مواد درگیر در واکنش متفاوت است. در طراحی راکتورهای شیمیایی برخی از پارامترها مانند دما، فشار و شدت جریان مواد ورودی و خروجی، توسط طراح قابل تغییر است [۴]. یکی از پارامترهای مهم در اندازه‌گیری راکتورهای زیستی اندازه‌گیری و کنترل کردن حجم لحظه به لحظه‌ای حباب اکسیژن در محلول می‌باشد و اهمیت زیادی در رشد و تکثیر میکروارگانیسم‌ها دارد [۵]. همگن‌سازی محلول مایع در راکتور زیستی خود اهمیت فراوانی دارد که موجب ایجاد نسل‌های گوناگون راکتور زیستی مانند راکتور زیستی حلقه‌ای و راکتور زیستی هواگرد و راکتور زیستی همزن دارو و ... شده است که در هیچ یک از این انواع کنترل هوشمند بر مبنای روشه همگن ساز دیده نشده است، که این خود عاملی بر کاهش کارایی است و تأثیر منفی در فرایند رشد و تکثیر میکروارگانیسم دارد [۶].

در راکتورهای زیستی در گذشته به جای استفاده از توری حباب ساز برای همگن‌سازی از روش‌های هواگردی یا راکتور زیستی جت‌دار و یا همزن‌دار استفاده می‌شود که هر یک از این موارد با معایبی همراه بوده از جمله آن ایجاد کف در سطح مایع و هزینه بر بودن و ... است که راکتور زیستی تولیدی هیچ یک از این معایب را نداشته. برای کنترل تعداد حباب و حجم آن‌ها در سطح مایع می‌توان از روش‌های مانند سنسور یا تصویربرداری لحظه‌ای استفاده کرد که روش به کارگیری سنسور، نقطه‌های وضعی به همراه دارد مانند ایجاد آلودگی در ظرف راکتور زیستی و دقت عمل پایین آن از این رو استفاده از روش پردازش تصویر لحظه‌ای دقیق‌ترین و مطمئن‌ترین روش برای کنترل حجم حباب‌ها در این پروسه خواهد بود [۷].

در نتیجه یکی از راه‌های بهبود کیفیت محل رشد میکروارگانیسم‌ها همراه با کنترل لحظه به لحظه و هوشمند حجم حباب‌های تولیدی در راکتور زیستی است که در این مقاله به روش

شده سلولی، اندازه‌های حباب و توزیع حباب‌ها انجام شده است. با افزایش سرعت سطحی هوا در بازه ۲-۰ سانتی‌متر بر ثانیه، شکستن حباب‌ها برجسته‌تر می‌شود و از این رو، تعداد حباب‌های اندازه کوچک‌تر افزایش می‌یابد.

اندرسون یک شبکه عصبی کانولوشنال مبتنی بر منطقه را پیشنهاد کرد که برای تشخیص حباب‌های هلیوم در میکروگراف‌های فنرهای فاصله دهنده راکتور Inconel X-750 تحت تابش نوترونی سازگار است [۲۶]. آن‌ها نشان دادند که این شبکه عصبی تجزیه و تحلیل‌هایی با دقت و تکرارپذیری همانند با آن چه توسط انسان تولید می‌شود. علاوه بر این، آن‌ها این روش را به عنوان چهار مرتبه بزرگ‌تر از تجزیه و تحلیل دستی نشان می‌دهند که امکان تولید مقادارها چشمگیری از داده‌ها را فراهم می‌کند. روش پیشنهادی را می‌توان با میکروگراف‌های کنتراست‌های گوناگون فرنل و سطوح بزرگ‌نمایی استفاده کرد.

با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر در پردازش تصویر مبتنی بر یادگیری عمیق، ماسک R-CNN توسط کیم معرفی و آموزش داده شد تا یک ابزار تشخیص خودکار حباب و استخراج ماسک ایجاد کند که در جریان‌های دو فاز گاز-مایع کار می‌کند [۲۷]. مجموعه داده آموزشی برای بهبود عملکرد مدل و به تاخیر انداختن تطبیق بیش از حد با مقدار محدودی از داده‌ها به شدت بهینه شده است. دامنه اندازه حباب قابل تشخیص (به ویژه حباب‌های کوچک‌تر) را می‌توان با استفاده از یک تابع کاهش وزن سفارشی افزایش داد. اعتبارسنجی با جریان‌های حباب‌دار گوناگون نتیجه‌های امیدوارکننده‌ای را به همراه دارد که AP50 به ۹۸ درصد می‌رسد.

با توجه به اقدامات و محاسبه‌های انجام شده در این پژوهش سعی بر آن شده از روشی صحیح و آسان با دقت بالا بهره گرفته شود به گونه‌ای که بار محاسبه‌ای کم‌تری را در بر داشته باشد و نیز در این پژوهش سعی بر آن شده که به کمک یک تصویر از یک زاویه حجم و تعداد برای حباب‌های موجود در راکتور زیستی مشخص شود.

روش پیشنهادی

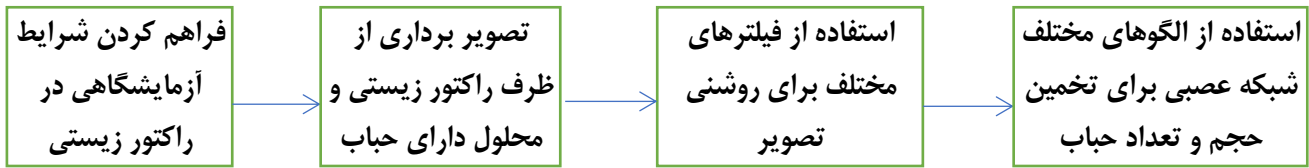
یکی از روش‌هایی که می‌توان در اندازه‌گیری به کار برد، استفاده از سنسور در درون محلول است که این فرایند خود موجب ایجاد ناخالصی و آلوده شدن محیط می‌شود و تأثیر منفی بر عملکرد کاربردی راکتور زیستی دارد و نیز سنسور از دقت کم‌تری نسبت به پردازش لحظه‌ای تصویر برخوردار است به این منظور از تحلیل لحظه‌ای تصویر استفاده می‌شود که روشی بدون ایجاد آلودگی و دقیق است.

تخمین بیضوی و پردازش تصویر به دست آورد و برای تعیین دقت سامانه آن را به روش جابه‌جایی آب مقایسه نمود [۲۱].

لی و همکاران با تابش نور لیزر به گوشت صدف خوراکی به طور موازی و تعیین اختلاف مکان نور در صفحه مسطح و سطح حجم در هر تصویر دو بعدی بعد سوم را اندازه‌گیری کردند. مدل سه بعدی جسم با داشتن عرض و ارتفاع در هر نقطه بازسازی شده و از این روش حجم نمونه محاسبه شد [۲۲]. همین پژوهشگران برای برآورد حجم و سطح چهار فرآورده سیب و طالبی و توت فرنگی و گوجه فرنگی از تصویر برداری شعاعی استفاده کرده‌اند. ایشان با گرفتن ۳۰ تصویر از گرداگرد سطح فرآورده در گردش‌های ۱۲ درجه‌ای اقدام به یافتن مرز در هر تصویر کرده‌اند پس با کنار هم قرار دادن این مرزها به کمک نرم‌افزار مخصوص مدل سه بعدی جسم را بازسازی و حجم و سطح رویه آن را محاسبه کرده‌اند این روش در عین برآورد دقیق حجم بار محاسبه‌ای زیادی دارد و در کاربردهای علمی قابل پیاده سازی نیست [۲۳].

دووسان سطح و حجم قطعات کوکتلی را به کمک تصویربرداری اندازه‌گیری کرد و با آشکارسازی شکل و حذف برآمدگی دو طرف کوکتل قطر آن مشخص شده که از آن با فرض منتظم بودن شکل کوکتل به صورت یک بیضی گون برای تخمین سطح و حجم قطعات کوکتل استفاده شده است [۲۳]. استفاده از یک دوربین و سطوح آینه کاری شده برای دریافت اطلاعات تصویری بیش‌تری و تعیین حجم میوه ساکن در محفظه نور پردازشی روشی است که *فابریزاز* از آن استفاده کرده است [۲۴]. با گرفتن تصویرهایی از سیب زمینی غلطان بر روی نقاله در یک سامانه پیوسته معادله‌ای را برآورد و وزن آنها بر اساس مجذور میانگین سطح تصویر و بیشینه قطر ۱۲ تصویر ارایه کرده است [۲۳]. معمولاً فرآورده‌های کشاورزی با فرض شکل هندسی متقارن مانند کره بررسی شده‌اند [۲۵]. در پژوهش‌هایی از تشابه هندسی اشکال برای تعیین حجم استفاده می‌شود.

سالا الگوریتمی را پیشنهاد کرد که برای تشخیص حباب‌ها به علت بسته شدن کاذب ایجاد شده است. تصویرهای جریان با استفاده از دوربینی با سرعت بالا گرفته می‌شود. الگوریتم مورد استفاده برای تشخیص حباب شامل تقسیم‌بندی تصویر مبتنی بر آستانه تطبیقی است که شامل تقسیم‌بندی، تشخیص لبه، گروه‌بندی بخش و برازش بیضی است. نخست اندازه حباب تشخیص داده می‌شود و توزیع اندازه حباب برای نرخ‌های گوناگون جریان هوا به دست می‌آید. شناسایی رژیم بر اساس میانگین کسر خالی پیش‌بینی



شکل ۱ - مرحله‌های گوناگون الگوریتم پیشنهادی

در بخش شبکه عصبی مطابق شکل ۲ به تشخیص شکل حباب در تصویرها پرداخته شده و به کمک کد نویسی به محاسبه تشخیص قطر حباب و حجم اکسیژن موجود در ظرف و نرخ رشد حباب در آن پرداخته می‌شود. برای این منظور نخست داده‌های خام خود را که بالغ بر ۳۸۶۴ فریم تصویر است به عنوان ورودی در نظر گرفته و شروع به اعمال عملیات ریخت‌شناسی مطابق شکل ۳ برای بهبود تصویر می‌شود. به این منظور یک سری فعالیت‌های ریخت‌شناسی بر روی تصویر صورت می‌گیرد تا تصویری مناسب برای انجام محاسبه‌های خود داشته باشیم. نخست پس زمینه موجود در تصویر حذف شده یعنی حباب‌های شناسایی شده به کمک شبکه عصبی نگه داشته می‌شود و مابقی تصویر که پس زمینه تصویر است حذف می‌شود، سپس تصویر توسط کدهای مشخص باینری شده و فیلترهای مربوط به حذف نویز به تصویر اعمال می‌شود. حباب‌هایی که از نظر ساختار شکلی در هر فریم دلخواه‌تر و کامل‌تر هستند را در همه فریم‌ها که حدود ۳۸۶۴ فریم است مشخص می‌کنیم و عملیات‌های ریخت‌شناسی برای افزایش کیفیت تصویر مانند شناسایی لبه افزایش کنتراست برجسته سازی و افزایش روشنی بر تصویر اعمال می‌شوند.

در تصویرهای ۲ الی ۴ مرحله‌های کار برای ایجاد فریم از تصویر ویدیوی موجود به نمایش در آمده است. در اینجا اعمال کد به منظور ایجاد تصویر باینری و شناسایی حباب‌های دلخواه نمایش داده شده است.

در مرحله بعد به انجام محاسبه‌ها برای تشخیص حجم حباب و سرعت رشد آن پرداخته شده است. نخست باید مشخص شود که هر پیکسل چند سانتی‌متر می‌باشد و نیز هر حباب پس از سپری شدن چند فریم به سطح می‌رسد.

می‌دانیم اگر فاصله کانونی با فاصله دوربین از دستگاه برابر باشد نسبت اشکال تصویر یک به یک خواهد شد. در اینجا در هنگام تصویر برداری فاصله دوربین تا حباب‌ها رعایت شده و برابر با همان فاصله کانونی است. با توجه به شکل‌های پیش مشاهده می‌شود که نرخ فریم‌های فیلم نمونه، ۲۵ فریم در ثانیه است یعنی کافی است فاصله بین دو فریمی که می‌خواهیم، تقسیم بر ۲۵ شود. یعنی اگر

هدف کلی این پروژه اندازه‌گیری حجم و تعداد حباب‌های تولیدی در راکتور زیستی بدون استفاده و وارد کردن جسم بیرونی (سنسور) به محلول و افزایش دقت در اندازه‌گیری حباب‌ها و افزایش سرعت و دقت در کنترل کردن حجم و تعداد حباب‌ها است. این پروژه شامل ۲ بخش است: ۱- اندازه‌گیری حجم حباب‌ها ۲- شمارش تعداد حباب‌های موجود در ظرف.

پس از اندازه‌گیری و تشخیص حجم و تعداد حباب‌های موجود نوبت به کنترل تعداد آن‌ها می‌رسد به این منظور با استفاده از شبکه‌های عصبی به تحلیل خروجی داده متلب پرداخته شده و حلقه‌ای کنترلی از ورودی به خروجی ایجاد شده است. مرحله‌های گوناگون الگوریتم در شکل ۱ دیده می‌شود.

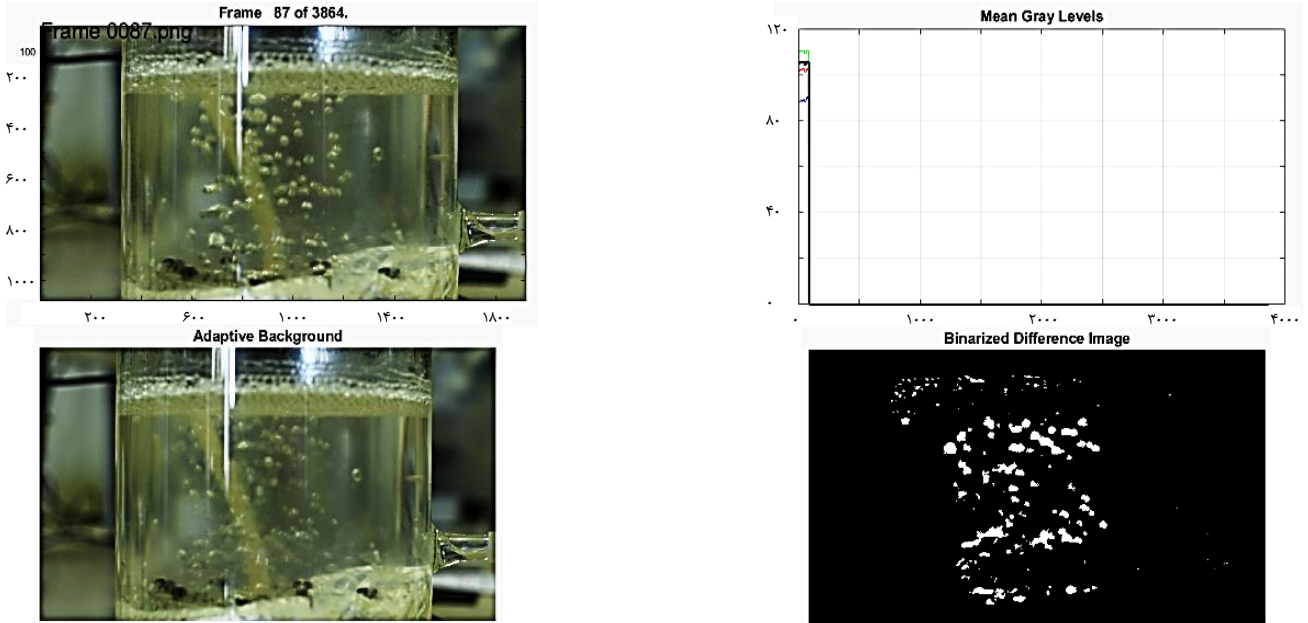
الگوریتم بالا مرحله‌های اندازه‌گیری حجم و تعداد حباب را بیان می‌کند. نخست برای به دست آوردن داده لازم است تا محیط مناسب را فراهم کرده و برای آماده کردن محیط مناسب باید یک فرمانتور فعال در اختیار داشته باشیم که پیوسته در حال تولید حباب برای همگن‌سازی و اکسیژن‌رسانی به محلول موجود در ظرف باشد

در مرحله بعد با استفاده از دوربین با قابلیت ۲۵ فریم در ثانیه با رعایت فاصله کانونی مناسب دوربین از ظرف که در اینجا ۳۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده در هر لحظه از ظرف تصویر برداری می‌شود سپس داده‌های به دست آمده برای پردازش تصویر به عنوان داده خام وارد سامانه پردازش تصویری می‌شود.

نکته دارای اهمیت در این تصویر برداری دلخواه نگاه داشتن نور محیط و نداشتن لرزش در ظرف است که این موهم کیفیت تصویر برداری را افزایش داده و ورودی دلخواه تری را برای پردازش به سامانه وارد می‌نماید.

نتیجه‌های عملی

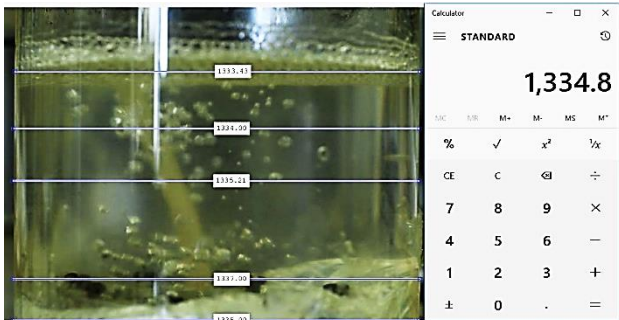
برای انجام مرحله‌های پژوهش نخست تصویرهای فیلم‌های گرفته شده را به فریم‌های تصویری تبدیل کردیم که در اینجا ۳۸۶۴ فریم ایجاد شده است. فاز پژوهشی این پروژه شامل دو بخش است: بخش شبکه عصبی و بخش محاسبه کد نویسی.



شکل ۲ - تشخیص حباب از پس زمینه



شکل ۳ - بهبود تشخیص حبابها بر مبنای الگوریتمهای مورفولوژی



شکل ۴ - اندازه‌های ظرف

به عنوان نمونه در فریم اول اندازه حباب V1 باشد و در فریم ۵۱ و نزدیک سطح V2 دو ثانیه طول کشیده تا حباب به آن اندازه برسد. در یک ثانیه ۲۵ فریم (عکس) داریم پس زمان برای یک فریم (عکس) برابر با ۱/۲۵ می‌شود یعنی هر فریم را در ۰/۰۴ ثانیه نشان می‌دهد. به طور میانگین ۸ فریم طول می‌کشد تا حباب از لحظه تولید به بالای ظرف برسد. پس:

$$\frac{radii_{max\ value} - radii_{min\ value}}{8} * 0.04 \quad (1)$$

در نتیجه طبق فرمول بالا سرعت رشد حباب را هم خواهیم داشت. با توجه به موارد گفته شده فرمول زیر را برای محاسبه فاصله داریم:

$$Distance\ to\ object(mm) = \frac{f(mm) \times real\ height(mm) \times image\ height(pixels)}{object\ height(pixels) \times sensor\ height(mm)} \quad (2)$$

که در آن: فاصله کانونی دوربین: ۳۰ میلی‌متر، فاصله دوربین از دستگاه: ۳۰ سانتی‌متر، فاصله در تصویر: ۰/۱۶ میلی‌متر

ساده‌ترین معادله برای محاسبه فاصله یک جسم عبارت است از:

$$\frac{x}{f} = \frac{X}{d} \quad (3)$$

که در آن x اندازه شی روی حس گر، f فاصله کانونی لنز، X اندازه شی و d نیز فاصله یک نقطه تا شی است.

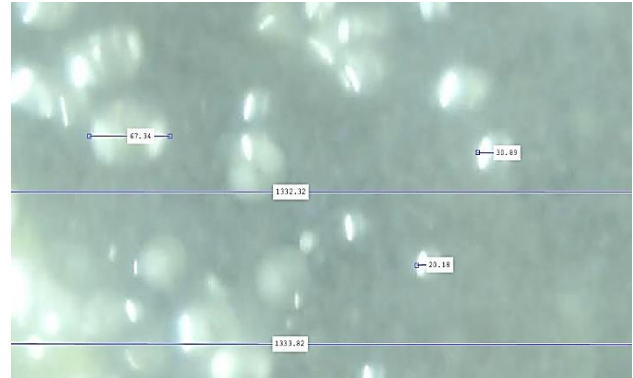
توجه کنید که (f,x) و (d,X) باید واحدهای یکسانی داشته باشند.

لذا حجم هر حباب به طور میانگین برابر $0/1954$ سانتی متر مکعب خواهد شد.

نتیجه گیری

با توجه به محاسبه های صورت گرفته با تقریب خوبی توانستیم حجم حباب و نرخ رشد آن را اندازه گیری کنیم. برای ایجاد تصویر دلخواه از فیلترهای بسیاری استفاده شد و دست آخر به کمک معادله های ایجاد شده حجم و سرعت رشد حباب محاسبه شد. با توجه به نتیجه ها و شواهد موجود استفاده از تعداد بالای فریم در محاسبه ها دقت را افزایش داده و برتری این پروژه سرعت و حجم بالای داده است چرا که در روش های پیشین تنها یک عدد شی مورد بررسی قرار می گرفت حال آن که ما در اینجا با انبوهی از حباب روبه رو هستیم. می توان از دوربین با کیفیت دلخواه تر برای افزایش دقت محاسبه ها استفاده کرد و یا این که از تصویرهای ۳ بعدی به منظور استفاده کنیم تا تعداد حباب ها را هم به طور دقیق بتوان محاسبه نمود به جای استفاده از دوربین موقت برای محاسبه های لحظه ای می توانیم دوربین را به طور دائم در کنار ظرف نصب نمود و به طور کلی استفاده از پردازش تصویر را در بازه های فراوانی برای اندازه گیری گسترش داد زیرا جایگزین مناسبی نسبت به سنسورها هستند.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱



شکل ۵ - شعاع حبابها

میانگین شعاع حبابها در شکل ۵، برابر ۱۶ پیکسل است. پس میانگین قطر حبابها برابر ۳۲ پیکسل خواهد شد. ارتفاع ظرف: ۳۰ سانتی متر، قطر ظرف: ۱۵ سانتی متر.

مدل دوربین nikon d810 = ۵۰ لنز ۱.8 و مقدار dpi برای آن ۲۴۰ یا ۳۰۰ می باشد. از سویی ارتفاع ظرف و قطر ظرف را پیش تر به عنوان داده داشتیم.

با توجه به تصویرهای بالا داریم:

به طور میانگین قطر ظرف ۱۳۳۲ پیکسل است، یعنی ۱۳۳۲ پیکسل برابر با ۱۵ سانتی متر است.

پس یک پیکسل به تقریب می شود $0/11261226$ سانتی متر. پس ۱۶ پیکسل که معادل شعاع حباب است برابر با $0/18$ سانتی متر و برای قطر آن ۳۲ پیکسل $0/36$ سانتی متر است.

برای محاسبه حجم کره از معادله (۴) استفاده می شود:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (4)$$

مراجع

- [1] Merchuk J., Garcia Camacho F., "Bioreactors: Airlift Reactors", *Encyclopedia of Industrial Biotechnology*, (1999).
- [2] Chisti Y., Jauregui-Haza U., *Oxygen Transfer and Mixing in Mechanically Agitated Airlift Bioreactors*, *Biochemical Engineering Journal*, **10**: 143-153 (2002).
- [3] Heijnen J., Hols J., Van Der Lans R., Van Leeuwen H., Mulder A., Weltevrede R., *A Simple Hydrodynamic Model for the Liquid Circulation Velocity in a Full-Scale Two-and Three-Phase Internal Airlift Reactor Operating in the Gas Recirculation Regime*, *Chemical Engineering Science*, **52**: 2527-2540 (1997).
- [4] Schaefer S., "Colorimetric Water Quality Sensing with Mobile Smart Phones", University of British Columbia, (2014).

- [5] Wilhe L.R., Suter D.A., Brusewitz G.H., "Physical Properties of Food Materials. Food and process Engineering Technology", Michigan, USA, 23-52 (2005).
- [6] Safwat M., Moustafa A., Theoretical Prediction of Volume, Sur Face Area, and Center of Gravity for Agricultural Products, *Transactions of the ASAE*, **14(2)**: 549-553 (1971).
- [7] Tabatabaefar A., Rajabipour A., Modeling the Mass of Apples By its Geometrical Attribu Ties, *Scientia horticul true*, **105**: 373-382 (2005).
- [8] Wright M.E., Tappan J.H., Sistler F.E., "The Size and Shape of Typical Sweet Potatoes", *Transactions*, (1986).
- [9] Ngoajio M., Kirk W., Goldy R., A Simple Model for Rapid and Nondestructive Estimation of Bell Papper Fruit Volume, *Hortscience*, **38(4)**: 509-511 (2003).
- [۱۰] علیرضا عابدینی مزرعه، علیرضا رضائی، کوثر احمدی، "اندازه گیری PH محلول فرماتور زیستی دارای شناساگر فنول رد با استفاده از پردازش تصویر و شبکه های عصبی RBF و ANFIS". *نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران*، **۳۹(۲)**: ۳۰۵-۳۱۳ (۱۳۹۹).
- [11] Abbasgholipour M., Omid M., Borghei A.M., "Development of an efficient algorithm for grading raisins based on color features", *Proceedings of the international conference on Innovations in Food and Bioprocess Technologies*, 14-17 October, Antalya, Turkiye, (2006).
- [12] Jafari A.A.S., Mohtasebi H., Egh bali jarom., Omid M., Weed Detection in Suger Beet Fields using Machine Vision, *Int.J .Agri. Biol.*, **8(5)**: 602-605 (2006).
- [13] Rezaee A., Partition Fuzzy Median Filter for Image Restoration, *Fuzzy information and engineering*, **13(2)**: 199-210 (2021).
- [14] Mojumda S., Jayas D.S., Classification of Cereal Grains using Machine Vision:Color Models, *ASAE*, **43(6)**: 1677-1680 (2000).
- [15] Paliwal J., Borhan M.S., Jayas D.S., Classification of Cereal Grain s using Aflated Scanner, *ASAE*, 036103 (2003).
- [16] Shahin M.A, Symons S.J., A Machine Vision System for Grading Lentils, *Canadian Biosystems Eng.*, **7**: 7-14 (2010).
- [17] Shigeta K., Motonaga K., Kida Y., Matsuo T., Motonaga Y., Matsuo T., Disting Uishing Damaged and Undamaged Chaff in Rice Whole Crophe Silaglage by Image Processing, *ASAE annual meeting*, 043125, (2004).
- [18] Forbes K.A, Tattersfield G.M., Estimating Fruit Volume from Digital Images, 28 Septembr - 1 October, Cape Town, South Africa, (1999).
- [19] Hahn F., Sanches S., Carrot Volume Evaluation using Image Algoritms, *J.Agric. Eng. Res.*, **75**: 243-249 (2000).
- [20] Wang T.Y., Nguang S.K., low Cost Sensor for Volume and Surface Area Computation of Axi-Symmetric Agriculture Products, *Y. food. Eng.*, **79**: 870-877 (2007).

- [21] Lee D.J., Lane R.M., Chang G.H., [Three- Dimensional Reconstruction for High-Speed Volume Measure Ment](#), *Machine Vision and Three-Dimensional Imaging Systems for Inspection and Metrology*, **4189**: 258-267 (2004).
- [22] Lee D.J., Elfert J., Zahan P., [Area and Volume Measurements of Object with Irregular Shapes using Multiple Silhouettes](#), *Optical engineering*, **45(2)**: 027202 (2006).
- [23] Du C.J., Sun D.W., [Estimating the Surface Area and Volume of Ellipsoidal Ham using Computer Vision](#), *journal of food engineering*, **73(3)**: 260-268 (2006).
- [24] Marchant J.A, Onyango C.M., Street M.J., [Computer Vision for Potato Inspection without Singulation](#), *Computers and Electronics in Agriculture*, **4(3)**: 235-244 (1990).
- [25] Saha P.K., Pal R., Sarkar S., Mukhopadhyay A., [A Novel Image Processing Technique for Detection of Pseudo Occluded Bubbles and Identification of Flow Regimes in a Bubble Column Reactor](#), *Measurement*, **189**: 110568 (2022).
- [26] Anderson C.M., Klein J., Rajakumar H., Judge C.D., Béland L.K., [Automated Detection of Helium Bubbles in Irradiated X-750](#), *Ultramicroscopy*, **217**: 113068 (2022).
- [27] Kim Y., Park H., [Deep Learning-based Automated and Universal Bubble Detection and Mask Extraction in Complex Two-Phase Flows](#), *Scientific Reports*, **11(1)**: 8940 (2021).