

بررسی محیط کشت ریزجلبک‌های بیودیزلی با استفاده از ماشین‌بینایی

سینا لبافی^۱ و علیرضا زاهدی^۲

چکیده

یکی از عوامل مهم در رشد ریزجلبک‌ها مقدار نمک لازم برای تغذیه آن‌ها است. طایین پژوهش، محیط کشت برای ریزجلبک نانوکلوپسیس، در غلظت‌های مختلف نمکی آماده شده و در هر شبانه‌روز میزان رشد ریزجلبک‌های فعال به کمک فناوری ماشین‌بینایی بررسی گردید. حداکثر و حداقل تراکم سلول‌های ریزجلبک در روز هفتم پرورش به ترتیب $10^5 \times 0.38 \pm 10^4 \times 286$ (در غلظت ۳۵ میلی‌گرم بر لیتر) و $10^5 \times 0.48 \pm 10^4 \times 168,58$ (در غلظت ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) سلول در هر میلی‌لیتر به دست آمد. در تحلیل سیستم رشد، الگوریتم رگرسیون خطی ساده (با کمترین خطا)، رگرسیون خطی، پرسپنترون چندلایه و پردازش گوسین (با بیشترین خطا) که به ترتیب دارای ضرایب همبستگی 0.9095 ، 0.9039 ، 0.8623 و 0.7335 بودند، نتایج خوبی را نشان دادند. همچنین سامانه توسط شبکه عصبی مصنوعی در محدوده ۴ تا ۲۰ نرون ارزیابی شد. بررسی داده‌ها نشان داد دیدگاه بیوسیستمی به کشت ریزجلبک به کمک پردازش تصویر ضمن دقت بالاتر و هزینه و وقت کمتر تخمین موفقیت‌آمیزی از روند رشد در غلظت‌های مختلف نمکی در مقایسه با دیگر روش‌های کنترل رشد به دست می‌دهد.

کلید واژه‌ها:

کشت ریزجلبک، غلظت نمکی، نانوکلوپسیس اوکولاتا، ماشین‌بینایی، شبکه عصبی

۱ مقدمه

سوخت‌های فسیلی را دارند. تلاش برای پیدا کردن جایگزین سوخت‌های فسیلی از دهه ۱۹۷۰ به دلیل افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و بالا رفتن گازهای گلخانه‌ای حاصل از سوخت‌های فسیلی رو به افزایش است [۲]. ۷۰ درصد انرژی مورد نیاز در دنیا به صورت سوخت و در بخش‌های حمل و نقل، کارخانه‌ها و گرمایش خانگی مصرف می‌شود. در اتحادیه اروپا، بخش حمل و نقل به طور تقریبی ۲۵ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای را دارا است. به علت توسعه سریع فعالیت‌های انسانی و مصرف بی‌رویه سوخت‌های فسیلی، بحران انرژی بزرگ‌ترین چالش قرن ۲۱ بوده و تخمین زده می‌شود که ذخایر گازی و نفتی زمین در طی ۴۰ تا ۶۰ سال آینده کاهش یابد [۳].

نگرانی در مورد کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، به خصوص نفت و گاز طبیعی، همواره با تغییرات آب و هوایی و افزایش گرمای زمین، موجب توجه بیشتر به منابع تجدید پذیر انرژی شده است [۴] و [۵]. از این رو سوخت‌های پاک نظیر بیودیزل و

ریز جلبک‌ها اهمیت تجاری و زیست‌محیطی زیادی به عنوان پایه زنجیره غذایی و تولیدکننده اکسیژن دارند و همچنین یک منبع طبیعی از ترکیبات با ارزش مانند اسیدهای چرب، آستروئیدها و کاروتنوئیدها هستند [۱]. در حال حاضر یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در دنیا تولید غذا و سوخت پایدار است. محتوای هیدروکربنی ریز جلبک‌ها مانند اسیدهای چرب توانایی جایگزین شدن به جای

این مقاله در آذرماه ۱۳۹۶ دریافت، در آذرماه ۱۳۹۸ پنجمین بازنگری و در خردادماه ۱۳۹۹ پذیرفته شد.

^۱ دانشجوی دکتری سیستم‌های انرژی- فناوری انرژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

رایانامه: sinalabbafi@yahoo.com

^۲ دانشکده فناوری‌های نوین، گروه سیستم‌های انرژی- محیط زیست، دانشگاه علم و صنعت

رایانامه: zahediar@iust.ac.ir

نویسنده مسئول: علیرضا زاهدی

شرایط نورپردازی و اندازه و ابعاد کوچک آن‌ها باشد. استفاده از فناوری ماشین‌بینایی به خاطر داشتن مزایایی همچون غیر مخرب بودن، کاهش هزینه‌ها، دقت بالاتر نسبت به سرشماری سلولی یا سنجش وزنی، ارائه نتیجه ثابت در شرایط مختلف و توانایی بررسی اجسام در نورهای مرئی (VIS)، نامرئی مادون قرمز (IR)، ماوراءبنفش (UV) و مادون قرمز نزدیک (NIR) به سرعت در حال گسترش و پیشرفت در کاربردهای گوناگون است. از سویی دیگر شبکه عصبی مصنوعی^۳ روشی هوشمند برای پردازش اطلاعات است که از سامانه عصبی زیستی الهام گرفته شده و مانند مغز به پردازش اطلاعات می‌پردازد. مغز یک سیستم پردازش اطلاعات با ساختار موازی و کاملاً پیچیده است که برای خواندن، نفس کشیدن، حرکت، تفحص و کلیه اعمال آگاهانه و بسیاری از رفتارهای ناخودآگاه فعالیت می‌کند. مغز برای محاسبه و جمع‌آوری حجم عظیمی از اطلاعات و سیگنال‌ها به زمانی کمتر از چند صدم ثانیه نیاز دارد. تحقیقاتی که با هدف بررسی تأثیرات عوامل محیطی مانند دما، غلظت نمکی و غیره انجام گرفته، غالباً منجر به ارائه روش‌هایی زمان‌بر و پرهزینه شده است [۱۳] و [۱۴].

روش‌های متداول برای اندازه‌گیری رشد ریزجلبک شامل استفاده از طیف‌سنج نوری^۴، تعیین میزان زیست‌توده بر اساس سنجش وزنی^۵، سرشماری سلول‌ها با استفاده از میکروسکوپ، سرشماری سلول‌ها با استفاده از روش طبقه‌بندی سلول‌ها به وسیله نشانه‌گذاری بر سطح آن‌ها با مواد دارای خاصیت تشعشع نوری^۶ هستند. روش طیف‌سنجی وابسته به چگالی کشت و میزان کلروفیل ریزجلبک است. این روش ممکن است به خاطر مواد حل‌نشده و ناخالصی‌ها (مواد غذایی ریزجلبک) دچار خطا شود. برای دقت بیش‌تر این روش همراه با روش سنجش وزنی یا سرشماری سلولی استفاده می‌شود. در روش سنجش وزنی، وزن زیست‌توده خشک یا تر اندازه‌گیری می‌شود. در صورت وجود ناخالصی در زیست‌توده، دقت روش کاهش می‌یابد. روش سرشماری میکروسکوپی سلول‌ها به دلیل خطاهای انسانی می‌تواند از دقت کافی برخوردار نباشد، این خطا در روش نشانه‌گذاری کاهش یافته است ولی نیازمند وقت و هزینه زیاد است.

علاوه بر تحقیقات پیشین زاهدی و همکاران [۱۵]، ملکوتیان و همکاران [۱۶] نیز به بررسی اثر دما بر روی رشد و بازدهی لیپید ریزجلبک نانوکروپسیس پرداختند. آنها ابتدا با استفاده از طیف‌سنج نوری میزان رشد سلولی را به طور روزانه اندازه‌گیری نمودند و سپس به وسیله کروماتوگرافی گازی تولید و تجمع لیپیدها را تعیین نمودند. آنها به این نتیجه رسیدند که محدوده دمایی

بیواتانول به‌عنوان جایگزین سوخت‌های فسیلی، به شدت مورد توجه قرار گرفته است.

به همین منظور در میان نسل‌های متداول سه‌گانه زیست‌توده برای تولید بیودیزل، ریزجلبک‌ها به عنوان نسل سوم در زمره موجودات زنده تک‌سلولی فتوسنتزکننده بوده که پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای کشت به‌عنوان محصولات پرانرژی دارند و قادر هستند تعداد زیادی از محصولات با ارزش نظیر لیپیدها (برای تولید بیودیزل) و قندها (برای تولید بیواتانول) را تولید کنند [۶] و [۷]. به طوری که تولید لیپید توسط ریزجلبک‌ها در حدود ۱۵ تا ۳۰۰ برابر بیشتر از سایر محصولات گیاهی است. ریزجلبک‌ها قادرند با شرایط مختلف محیطی سازگار شوند؛ بنابراین امکان یافتن شرایط محیطی مناسب از لحاظ رشد در گونه‌های مختلف ریزجلبکی عمدتاً به دلیل عدم نیاز به آب کشاورزی و خاک حاصلخیز بیشتر است؛ در حالی که این مسئله در سایر منابع زیست‌توده مانند سویا، کانولا و آفتاب‌گردان وجود ندارد. تغییر شرایط محیطی علاوه بر تأثیر بر میزان رشد و تولید چربی می‌تواند بر کیفیت لیپید نیز اثرگذار باشد؛ چرا که تکثیر و تجمع لیپیدها در بافت سلول انجام می‌شود [۸].

در بین گونه‌های مختلف ریزجلبک‌ها یکی از گونه‌های محتوی درصد لیپید بالا و مناسب برای تولید سوخت بیودیزل، ریزجلبک‌های نانوکروپسیس هستند که دارای شش گونه شناخته شده بوده و گونه شاخص در بین آن‌ها اوکولاتا^۱ است [۹]. اگرچه گونه‌های این جنس اغلب در محیط‌های دریایی شناخته شده‌اند، لیکن در محیط‌های آب شیرین و شور نیز یافت می‌شوند [۱۰]. میزان رشد زیست‌توده در ریزجلبک‌ها از عوامل ضروری در کاهش هزینه‌های تولید بیودیزل است. با توجه به این مساله روشهای گوناگونی برای بررسی و بهینه‌سازی رشد بافتهای گیاهی وجود دارد که در این میان فناوری ماشین‌بینایی تکنیک نوینی است که در مهندسی بیوسیستم می‌تواند در راستای بررسی رشد مورد استفاده قرار گیرد [۱۱]. در یکی از این موارد هندراوان و موراس [۱۲] به تاثیر میزان آب موجود در گیاه سوناگوک موس^۲ در رشد آن به وسیله ماشین‌بینایی با روش ویژگی‌یابی پرداخته‌اند. همچنین از ماشین‌بینایی استفاده فراوانی در پیش‌بینی آفت و بیماری در گیاهان می‌شود [۱۳].

سامانه‌های مبتنی بر فناوری ماشین‌بینایی از پنج قسمت اصلی شامل سیستم نورپردازی، دوربین، پردازشگر، کارت تصویرگیر و نرم‌افزار تشکیل شده‌اند. در میان تمامی انواع منابع نورپردازی، امروزه استفاده از لامپ‌های مهتابی در سامانه‌های مبتنی بر ماشین‌بینایی افزایش یافته است که این مساله می‌تواند به دلیل مزایای این نوع لامپ‌ها شامل طول عمر زیاد، منبع تغذیه DC، یکنواختی در

³Artificial Neural Network

⁴ Spectrophotometry

⁵ Gravimetric

⁶ Flow cytometry

¹Nannochloropsis Oculata

²Sunagoke moss Rachomitriumjaponicum

انجام شده نشان داد که دمای مطلوب برای رشد ریزجلبک‌ها دمایی بین ۱۵ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد است [۱۵]؛ بنابراین دما به کمک کنترل فازی معادل ۲۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد [۱۸]. از کنترلر دما به منظور تنظیم دمای محیط کشت ریزجلبک‌ها در مقدار ثابت استفاده شد؛ چراکه نوسانات دما باعث مرگ ریزجلبک‌ها می‌شود و یا دست کم در رشد آن‌ها اختلال ایجاد می‌کند [۱۹].

۳ بررسی میزان رشد

به منظور ارزیابی میزان رشد، در فواصل زمانی ۲۴ ساعت از ریزجلبک‌های فعال از ظروف کشت نمونه برداری شد. تراکم سلول‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل Nikon Eclipse 50i و لام Neubauer با محفظه شمارش به عمق ۰٫۱ میلی‌متر شمارش شدند (شکل ۱). برای جلوگیری از حرکت سلول‌ها ۲ درصد لوگول (۵٪ ید و ۱۰٪ پتاسیم یدید) به نمونه مورد استفاده برای پردازش تصویر همانند شکل ۲ اضافه گردیده و تعداد سلول‌ها به وسیله رابطه ۱ محاسبه گردید [۲۰].

(۱) تعداد سلول‌های شمارش شده $\times 10^6 =$ تعداد سلول در لیتریک

پس از رسیدن تراکم ریزجلبک به حداکثر مقدار با استفاده از رابطه ۲ میزان نرخ رشد ویژه ریزجلبک در غلظت‌های مختلف به دست آمد.

$$(۲) \quad \text{لگاریتم تراکم ثانویه} - \text{لگاریتم تراکم اولیه} = \text{نرخ رشد ویژه} \times \text{زمان}$$

۴ فناوری ماشین بینایی

در این تحقیق، فناوری ماشین بینایی به منظور استخراج ویژگی‌های تصاویر ریزجلبک استفاده گردید تا بتوان نرخ رشد سلول‌های ریزجلبک را به عنوان معیاری از درصد لپید موجود پیش‌بینی کرد. طریقه انجام این روش در شکل ۳ نشان داده شده است. این فرایند با استفاده از جعبه ابزار تحلیل تصویر در برنامه متلب کنترل می‌شد. در این پژوهش از دو نرم‌افزار Matlab 2019 و Weka3 استفاده گردید.

۵ پیش‌پردازش

به منظور بررسی و تحلیل تصویر از محیط کشت ریزجلبک‌ها، اطلاعات ورودی از جهت نویز و برداشت تصویر مورد پیش‌پردازش قرار گرفتند. با توجه به یکسان بودن شرایط تصویربرداری اعم از شدت نور و وجود محیط عاری از آلودگی در همه موارد نیاز به پیش‌پردازش بیشتری نبود.

مناسب برای تولید لیپید ریزجلبک نانوکلوپسیس ۲۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد است که شباهت نتایج آنها با تحقیق حاضر بسیار محسوس است. با این حال این روش‌ها بسیار پرهزینه و زمان‌بر هستند. در نتیجه به تکنیک نوینی نیاز است که زمان و هزینه‌های انجام آزمایش را کاهش دهد. با وجود این، تاکنون از سیستم ماشین بینایی جهت بررسی و بهینه‌سازی رشد ریزجلبک با تغییرات شرایط محیطی استفاده نشده است و تنها لکشمی و همکاران [۱۷] به بررسی میزان رشد جلبک کولرلاولگاریس در طول گذشت دوره زمانی رشد با روش پردازش تصویر پرداخته‌اند.

در این تحقیق با استفاده از تکنیک پردازش تصویر تأثیر عوامل محیطی آب بر روی رفتار و رشد ریزجلبک نانوکلوپسیس اوکولاتا و بهینه‌سازی شرایط رشد بررسی گردید. علاوه بر ارائه تکنیک نوین در بررسی رشد، جنبه نوآوری دیگر در تحقیق حاضر این بود که با استفاده از حداقل زمان از میزان رشد ریزجلبک آگاهی حاصل می‌شد تا زمان بهینه برداشت جهت حصول بیشترین میزان لیپید و در نتیجه کاهش هزینه‌های تولید بیودیزل به طور چشمگیری کاهش یابد. بدین منظور با آنالیز رنگ و تکنیک پردازش تصویر می‌توان از چگونگی روند رشد ریزجلبک در زمان‌های متفاوت اطلاعات کسب کرد.

۲ مواد و روش‌ها

۲-۱ مواد

سویه نانوکلوپسیس مورد آزمایش این تحقیق، از گروه بیوتکنولوژی دانشکده داروسازی دانشگاه علوم پزشکی تأمین گردید. در این مطالعه از گونه اوکالاتا در محیط کشت استفاده شد. همچنین به منظور تکرارپذیری آزمایش‌ها، هر مورد سه بار تکرار گردید. در ابتدا جهت کشت اولیه از مقداری ریزجلبک که حاوی تعداد ۱۰۰ هزار سلول در هر میلی‌لیتر بود، با ترکیب مقداری از آب خلیج فارس به همراه محیط کشت استفاده شد.

۲-۲ شرایط کشت

در هر مرحله مقداری از اوکالاتا کشت داده شد. بر این اساس از سه غلظت نمکی ۳۵، ۷۰ و ۱۰۰ گرم بر لیتر استفاده گردید. آب دریا دارای شوری ۳۰ گرم بر لیتر بوده به منظور تهیه غلظت نمکی ۷۰ و ۱۰۰ گرم بر لیتر نمک طبیعی دریا تهیه شده و به آب دریا اضافه شد. به دلیل اینکه در این تحقیق از سامانه ماشین بینایی استفاده شده بود، در نتیجه امکان تصویربرداری قسمتی و یا تمام محیط کشت با توجه به کادر دوربین به کار گرفته شده وجود داشت. در این تحقیق به منظور اندازه‌گیری غلظت مورد نظر از غلظت سنج^۱ قابل حمل AZ مدل ۸۶۰۲ استفاده شد. مطالعات

^۱Salinity meter

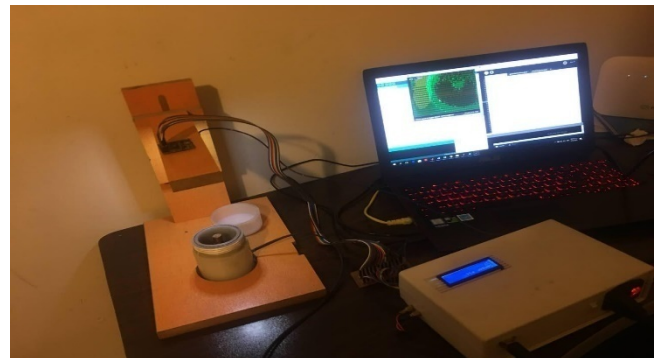
خط تلویزیون و ۵۱۰×۴۹۲ پیکسل است. برای تبدیل تصاویر آنالوگ به دیجیتال از یک کارت تصویرگیر^۱ با مشخصات Avid استفاده شد. به کمک این کارت امکان ارتباط دوربین و رایانه فراهم و قابلیت تنظیم و عکس برداری در زمان مورد نیاز برای نرم-افزار ایجاد گردید. از ویژگی‌های این کارت وضوح ۵۷۶×۷۲۰ و سرعت عکس برداری ۲۵ فریم در ثانیه بود.

۵-۲ کاهش نویز

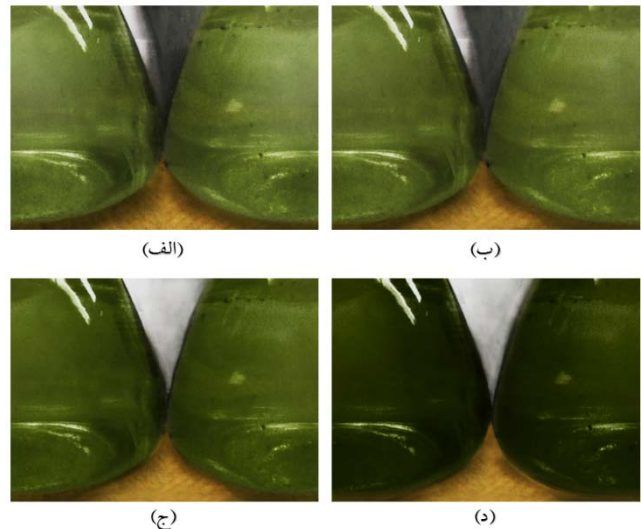
به منظور کاهش نویز^۲، از یک فیلتر پایین گذر گوسین ساده^۳ به ابعاد ۳*۳ استفاده شد که تصویر گرفته شده را همانند شکل ۴ به تصویر ساده تبدیل می‌کرد. ابعاد کوچک ۳*۳ به آن دلیل انتخاب شد که دارای میزان نویز بوده و از این جهت برای فیلتر مناسب بود. از طرفی مات‌شوندگی در ابعاد بالاتر سبب کاهش دقت نتایج می‌شد. از سوی دیگر به دلیل این که در فیلتر گوسین بیش‌ترین مقدار به پیکسل مرکزی داده می‌شود و پیکسل‌های مجاور، وزنی متناسب با مقدار فاصله‌شان تا پیکسل مرکزی دارند، لذا مقدار مرزبندی بهتر حفظ می‌شود. به طور کلی هر چه فاصله دورتر می‌شود، مقدار وزن نیز کوچک‌تر می‌شود. در نتیجه باعث حفظ بهتر لبه‌ها و مرزها می‌گردد. به علاوه این که انتخاب فیلتر میانه به عنوان یک فیلتر غیرخطی به منظور کاهش نویز در مقایسه با فیلتر گوسین ساده، تفاوت چندانی نداشته و تنها مزیت آن نسبت سرعت بیشتر فرآیند است، در دستور کار قرار نگرفت. این مساله در تحقیقات انجام شده نیز به اثبات رسیده است [۱۷]، [۱۹] و [۲۰]. در پژوهش لکشمی و همکاران [۱۷] از فیلتر میانه به ابعاد ۳*۳ استفاده شده که تحلیل نتایج در این تحقیق تفاوتی میان دو فیلتر استفاده شده نشان نداد. همچنین بر طبق این تحقیقات فیلتر میانه برای کاهش نویز در تصویر سیاه و سفید با نتایج حاصل با فیلتر پایین گذر ساده مطابقت داشت. لذا در این پژوهش از فیلتر پایین گذر ساده گوسین استفاده شد. انحراف استاندارد در نوار ابزار تحلیل تصویر OpenCV محاسبه گردیده و مطابق با معادله ۳ محاسبه شد [۱۷].

$$\begin{cases} \sigma_x = 0.3 \left(\frac{n_x}{2} - 1 \right) + 0.8 \\ \sigma_y = 0.3 \left(\frac{n_y}{2} - 1 \right) + 0.8 \end{cases} \quad (3)$$

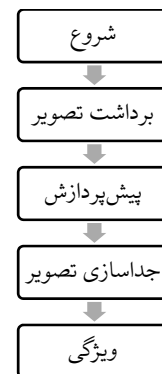
که در آن، n بعد تصویر می‌باشد. در نهایت مدل اطلاعات پیکسل‌های تصاویر خروجی تبدیل به مدل دوتایی شدند و در دامنه صفر تا یک استقرار یافتند.



شکل ۱- سامانه پردازش تصویر متصل به محیط کشت ریزجلبک



شکل ۲- تصاویر مختلف از محیط کشت در روزهای (الف) اول، (ب) هفتم، (ج) چهاردهم و (د) بیست و یکم مورد استفاده در پردازش تصویر



شکل ۳- مراحل پیشبرد فناوری ماشین بینایی

۵-۱ برداشت عکس

در این تحقیق از ۴ چشمه روشنایی FPL ۳۶ واتی هم جهت نوردهی به ریزجلبک و هم جهت نورپردازی از مقابل استفاده شد. سامانه پردازش تصویر ساخته شده در این تحقیق شامل دو بخش سخت-افزار و نرم افزار بود. در قسمت سخت افزار از یک دوربین آنالوگ CCD مدل PROLINE- 565s استفاده گردید که دارای ۴۸۰

¹ Capture card

² Noise

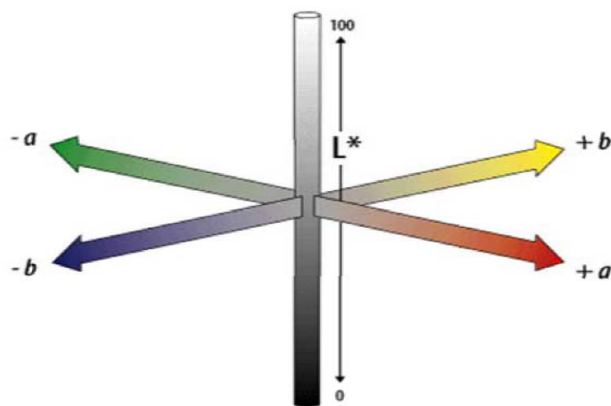
³ Simple Gaussian low filter pass

۶ جداسازی تصویر

تصاویر به دست آمده بعد از عملیات بر روی محیط کشت ریزجلبک در شکل ۷ قابل مشاهده است. به این صورت که در شکل ۷-الف کانال *a تصویر LAB ترسیم گردید. سپس به کمک فیلتر پایین گذر گوسینساده تصویر ۷-ب به دست آمد. پس از آن به کمک LAB محیط دوجزئی ۷-ج رسم گردید و در نهایت با استفاده از جداسازی تصویر شکل نهایی ۷-د به تصویر کشیده شد. از طریق شکل مذکور محیط کشت از محیط پیرامون آن جداسازی گردید.



شکل ۵- تصویر RGB محیط کشت ریزجلبک که به LAB تبدیل شد

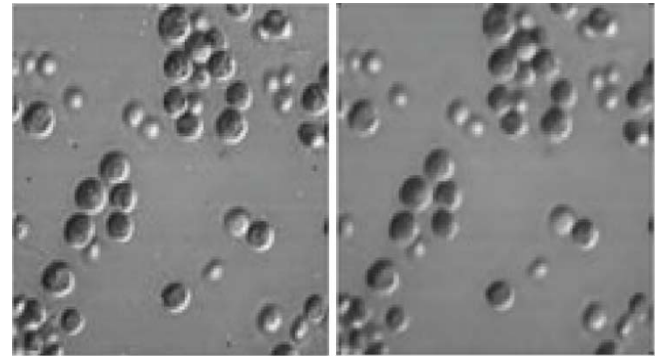


شکل ۶- تصویر سه بعدی فضای رنگی LAB

۶-۲ استخراج محیط

به منظور مشخص شدن ترکیبات و اجزاء مرتبط در تصاویر دو جزئی استخراج محیط در دستورکار قرار گرفت. به این صورت که ارتباط هر پیکسل با مقایسه مقدار پیکسل مجاور مورد بررسی قرار گرفته و پیکسل‌های متعلق به یک جزء یکسان تصویر با یک مشخصه خاص نشانه‌گذاری شدند. به این معنی که در تصویر دو جزئی دو پیکسل P و Q با هم مرتبط هستند اگر در یک مسیر پیکسلی (P_0, \dots, P_n) وجود داشتند، به نحوی که $P_0=P$ و $P_n=Q$ و به ازای هر i $(1 \leq i \leq n)$ P_{i-1} و P_i همسایه باشند. با اعمال این فرآیند نشانه‌گذاری و حذف پس‌زمینه دو ظرف حاوی محیط کشت ریزجلبک، به صورت شکل ۸ در آمد.

با هدف طبقه‌بندی اطلاعات جداسازی پیکسل‌های به هم مرتبط در تصویر از لحاظ اطلاعاتی صورت پذیرفت. در این تحقیق، به علت وجود نور محیط علاوه بر نور سیستم در تصاویر کشت ریزجلبک این قسمت‌ها جداسازی شدند. به همین دلیل جداسازی تصاویر رنگی و استخراج محیط در دستورکار قرار گرفت.



الف

ب

شکل ۴- (الف) تصویر دارای نویز، (ب) تصویر فیلترشده و بدون نویز

۶-۱ جداسازی تصویر رنگی

به دلیل لزوم نورپردازی دائمی و با شدت بالا در صنعت تولید و کشت ریزجلبک حذف نور محیط و استفاده از مدل رنگی LAB به ناچار می‌بایست صورت می‌پذیرفت. فضای رنگی LAB بیانگر مقدار روشنایی، فضاها رنگی بین سبز تا قرمز و آبی تا زرد است که در این تحقیق، پارامترهای مهمی محسوب می‌شدند. علاوه بر این فضای رنگی مذکور بسیار مناسب برای تصاویری است که کم‌ترین بافت پیچیده را دارند. در این پژوهش بافت پیچیده وجود نداشت [۲۱]. شکل ۵ تصویر RGB محیط کشت ریزجلبک و تصویر تبدیل شده LAB آن را نشان می‌دهد. در این فضای رنگی یک خروجی برای روشنایی و دو خروجی رنگی *a و *b که به عنوان لایه‌های رنگ شناخته می‌شوند، وجود دارند. هنگامی که رنگ تصویر ریزجلبک در محور قرمز-سبز تغییر کند، ترکیب رنگ از تصویر LAB حاصله برای پردازش‌های بعدی انتخاب می‌شود. به منظور جداسازی نواحی دارای لکه روشن از تصویر دارای ترکیب رنگی *a، مقدار متوسط شدت به عنوان مقدار نهایی در نظر گرفته شد. این عمل تصویر خاکستری را به یک تصویر دو جزئی سیاه و سفید تبدیل می‌کرد که هر پیکسل دارای مقدار صفر یا یک است [۲۲] (شکل ۶).

در این مرحله برای به دست آوردن شکل دقیق‌تر تعدادی عملیات دوجزئی بر تصویر خروجی اعمال گردید. تعدادی از

۷ استخراج بردار ویژگی

با هدف یافتن زیرمجموعه‌ای از متغیرهای اطلاعاتی بر مبنای داده‌های تصویری و کاهش اطلاعات مورد نیاز در این تحقیق از استخراج ویژگی استفاده شد. پارامترهای مرتبط عبارت بودند از: میانگین، واریانس و چولگی [۲۳]. از آنجا که سایر معیارها با توجه به تحقیقات قبلی با موضوع پردازش تصویر محیط کشت مورد بررسی قرار نگرفته است، لذا در این پژوهش نیز یادگیری عمیق مورد بررسی قرار نگرفت. مهمترین وجه تمایز بین شبکه عصبی و روشهای یادگیری عمیق، در تعداد لایه‌های زیاده‌تر این روشها است. اما در حقیقت در این پروژه یادگیری عمیق کاربرد نداشت؛ چون لایه‌های مخفی در تصویر وجود نداشته و نیاز به عملیات اصلاحی پیچیده به منظور برداشت تصویر مورد نیاز نبود. لذا شبکه مصنوعی برای برداشت ویژگی مناسب تر تشخیص داده شد.

۷-۱ پارامترهای ویژگی

اگر x مقدار پیکسل در تصویر دو بعدی به ابعاد $m*n$ باشد، میانگین به عنوان پارامتر اول معرفی شده در این تحقیق به صورت رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$\bar{x} = \frac{1}{mn} \sum_{(i,j) \in I} x_{ij} \quad (4)$$

از طرفی به کمک ویژگی واریانس می‌توان میزان پراکندگی اعداد را محاسبه کرده و یکی از مقادیری است که نشان می‌دهد اعداد چه مقدار از میانگین فاصله دارند و به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$Var = \frac{1}{mn} \sum_{(i,j) \in I} (x_{ij} - \bar{x})^2 \quad (5)$$

پارامتر سوم مورد بررسی چولگی بود که مقدار عدم تقارن پخش احتمالی مقادیر حقیقی متغیرهای پراکنده بوده و می‌تواند مثبت، منفی و یا صفر باشد. مقدار منفی به این معنا است که تابع چگالی احتمال، دامنه آن بیشتر در سمت چپ مقدار میانگین می‌باشد و مقدار مثبت نشان دهنده دامنه بیشتر تابع در سمت راست مقدار میانگین است. چولگی صفر بیانگر دامنه‌ای برابر در سمت راست و چپ مقدار میانگین است.

$$Skew = \frac{\frac{1}{mn} \sum_{(i,j) \in I} (x_{ij} - \bar{x})^3}{s^3} \quad (6)$$

از آنجا که تصاویر با سطح تیره‌تر نسبت به سطح روشن‌تر دارای مقدار چولگی بزرگ‌تر هستند، لذا این ویژگی می‌توانست معیار مناسبی برای نرخ رشد سلول‌های ریزجلبک باشد. نقطه اوج نمودار نمایش دهنده پخش احتمالات (یا چولگی) داده‌ها در اطراف مقدار میانگین است. مقدار اوج بالا برای پخش،

نشان‌دهنده نقطه اوج تیزتر و دامنه بیشتر است. در مقابل مقدار اوج کم دارای نقطه اوج ملایم‌تر و کمتر است.

$$Kurt = \frac{\frac{1}{mn} \sum_{(i,j) \in I} (x_{ij} - \bar{x})^4}{s^4} \quad (7)$$

۷-۲ روش‌های بررسی محیط کشت

به منظور بررسی میزان رشد از اختلاف تجمع سلولی بین دو روز مختلف و رابطه ۱ استفاده شد. هدف کلی شناسایی ویژگی‌هایی از تصویر بود که بتوان از آن‌ها برای بررسی وضعیت کشت استفاده کرد. تصاویر به دست‌آمده از محیط کشت ریزجلبک (شکل ۲) دارای کیفیت بالایی بوده و اختلال خاصی در آن‌ها وجود نداشت.

بنابراین با استفاده از پیش‌پردازشی تغییر شدت روشنایی پیکسل‌های تصویر به منظور ارتقای کیفیت آن‌ها یا حذف اختلال در تصاویر، اعمال گردید. قطعه‌بندی یا جداسازی نواحی مورد نظر در تصویر یکی از اصلی‌ترین و پیچیده‌ترین مراحل پردازش تصویر بود. روش‌های مختلفی در این زمینه معرفی شده که به سه دسته کلی آستانه‌گذاری، لبه‌یابی و درونیابی تقسیم می‌شوند. در این تحقیق، از روش آستانه‌گذاری برای قطعه‌بندی تصاویر استفاده شد. به منظور پیاده‌سازی این روش، ابتدا تصاویر رنگی با میانگین گرفتن از سه کانال، R، G، B به تصویر خاکستری تبدیل شدند. بهترین توصیفگر تصاویر تک رنگ شدت (سطح خاکستری) است. برای تبدیل تصویر با فرمت RGB به HSI از روابط ۸ تا ۱۱ استفاده شد:

$$H = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360 - \theta & B > G \end{cases} \quad (8)$$

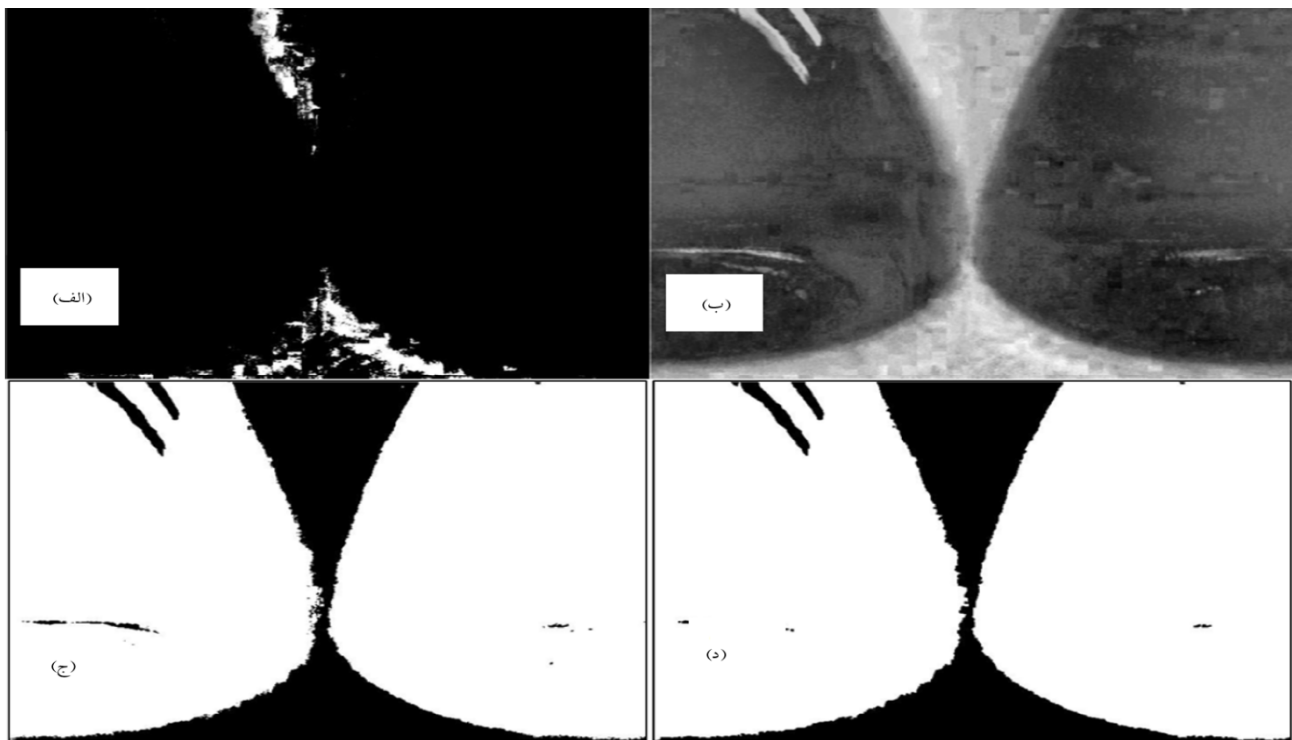
$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\sqrt{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^2}} \right) \quad (9)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)] \quad (10)$$

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (11)$$

به منظور استخراج اطلاعات، لازم بود تا محیط کشت مورد نظر از زمینه جدا شده و جداسازی تصاویر صورت پذیرد. از تصاویر گرفته شده توسط برنامه Matlab، تصاویر از فضای رنگی RGB به LAB تبدیل شدند. سپس مولفه‌های XYZ بر اساس درصد رنگ‌های اصلی به صورت روابط ۱۲ و ۱۳ محاسبه گردیدند [۲۴].

$$\begin{cases} L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16 \\ A^* = 500 [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ B^* = 200 [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{cases} \quad (12)$$



شکل ۷- (الف) کانال a* تصویر LAB، (ب) اعمال فیلتر پایین گذر گوسین ساده، (ج) تصویر محیط دو جزئی، (د) تصویر دو جزئی کشت ریزجلبک پس از جداسازی از محیط پیرامون

که در آن F بردار نرمال شده بردار ویژگی X است. شکل ۹ نمایش دهنده تصویر نمونه ریزجلبک و بردار ویژگی نرمال شده آن است.

۸ شبکه عصبی مصنوعی

شبکه عصبی مصنوعی یک روش هوشمند برای تحلیل اطلاعات مانند سیستم‌های عصبی مثل فرآیند تحلیل اطلاعات مغز است. به منظور استخراج ویژگی‌های رنگی شبکه عصبی مصنوعی، یککلاهی مخفی تعداد نرون‌های متفاوت (از ۴ تا ۲۰) طراحی و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با وارد کردن سه مقدار در مدل شبکه عصبی مصنوعی، این شبکه قادر به پیش‌بینی میزان رشد با درصد دقت بالایی خواهد بود.

۹ نتایج و بحث

اطلاعات به دست آمده با استفاده از آزمون تحلیل واریانس به وسیله نرم‌افزارهای Matlab و Weka با سطح معناداری معادل ۰,۰۵ جمع‌آوری شد. میزان رشد ریزجلبک نانوکروپسیس اوکولاتا در محدوده غلظت نمکی متفاوت در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده مشاهده شد که تراکم سلولی ریزجلبک نانوکروپسیس اوکولاتا در غلظت ۳۰ گرم بر لیتر در طول دوره پرورش به طور معنی‌داری بیشتر از غلظت‌های ۷۰ و ۱۰۰ گرم بر لیتر و همچنین تراکم سلول‌ها در غلظت ۱۰۰ گرم بر لیتر کمتر از تراکم شمرده شده در غلظت ۷۰ گرم بر لیتر بوده است.

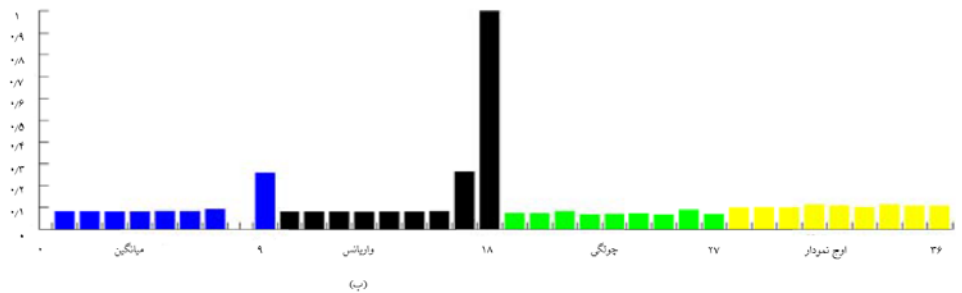
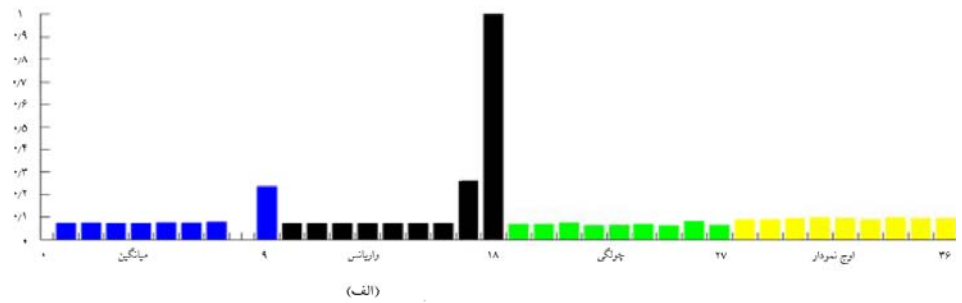
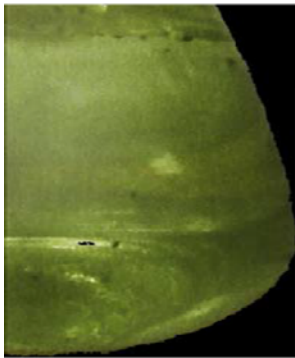
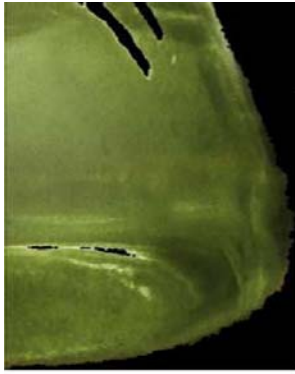
$$\begin{cases} X = 0.607R + 0.174G + 0.201B \\ Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \\ Z = 0.000R + 0.066G + 1.117B \end{cases} \quad (13)$$



شکل ۸- (الف) تصویر جدا شده محیط شماره ۱، (ب) تصویر جدا شده محیط شماره ۲

بردار ویژگی مورد نظر با ترکیب ویژگی‌ها از هر کانال رنگی منفرد به صورت ترکیبات رنگی r، g، b از فضای رنگی RGB، l، a و b از LAB و s، h و i از مدل رنگی HSI تشکیل می‌شود. این کار یک بردار ویژگی کلی با طول ۳۶ برای هر تصویر ریزجلبک تشکیل داد. بردار ویژگی سپس با معادله ۱۴ نرمال گردید:

$$F_{Normal} = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (14)$$



شکل ۹- (الف) محیط کشت شماره ۱ و بردار ویژگی نرمال شده آن، (ب) محیط کشت شماره ۲ و بردار ویژگی نرمال شده آن

ساده، رگراسیون خطی، پرسپترون چندلایه و پردازش گوسیون استفاده شد. در این روش‌ها، شاخص‌های آماری ضریب همبستگی، میانگین خطای مطلق و میانگین مربع خطا محاسبه گردید.

۹-۱ الگوریتم رگراسیون ساده

در این بخش پس از این که داده‌ها آماده شدند، جهت پیش‌بینی داده‌ها از الگوریتم رگراسیون ساده استفاده شد. شمایی کلی از تحلیل رگراسیون ساده به این صورت است که تحلیل گر حدس می‌زند که بین حداقل دو متغیر نوعی ارتباط وجود دارد و این ارتباط به صورت یک خط بین دو متغیر است، در صورتی که پس از ثبت داده‌ها در نمودار، داده‌ها تقریباً (نه لزوماً دقیقاً) در امتداد یک خط پراکنده شده باشند، حدس تحلیل‌گر تایید شده است. تفاوت بین نقاط و تصویر آن‌ها بر روی خط رگراسیون، خطای برآورد محسوب می‌شود. معمولاً فرض می‌شود خطاها یکدیگر را خنثی می‌کنند، به عبارت دیگر مجموع خطاها برابر صفر است. همچنین فرض می‌شود خطای موجود در یک مشاهده رابطه‌ای با خطاهای دیگر ندارد و در نهایت تغییرات بین خطاها ثابت در نظر گرفته می‌شود. ابتدا می‌بایست توسط برنامه داده‌ها ارزیابی می‌شدند. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، الگوریتم موجود توانست نتایج خوبی را به دست آورد که شامل دقت ۹۰ درصد، میانگین خطای مطلق ۲۸۶۳۴ و میانگین مربع خطا ۳۳۱۳۱ بود.

نتایج حاصل از آزمون واریانس نمایش داده شده در جدول ۱ نشان می‌دهد اختلاف بین میزان رشد سلولی در دماهای متفاوت معنادار است ($p < 0.05$). از این رو با توجه به نتایج به دست آمده (جدول ۲) حداکثر تراکم سلول‌های ریزجلبک در روز هشتم پرورش به ترتیب $286,23 \times 10^4 \pm 0,38 \times 10^5$ سلول در هر میلی‌لیتر در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و حداقل تراکم در غلظت نمکی ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر با تراکم $168,58 \times 10^4 \pm 0,48 \times 10^5$ سلول در هر میلی‌لیتر حاصل شد. همچنین نتایج حاصل از بررسی نرخ رشد ویژه غلظت‌های مختلف (جدول ۲) حاکی از افزایش معنی‌دار نرخ رشد ویژه در غلظت ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به غلظت‌های ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر بود.

نتایج حاصل از بررسی رشد سلول‌های ریزجلبک نانوکروپسیس و رسیدن به مرحله ثبات حاکی از آن است که سلول‌های پرورش داده شده در غلظت نمکی ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر با شیب بیشتری نسبت به دو غلظت دیگر به حداکثر تراکم رسیدند.

به منظور ارزیابی و حصول الگوریتم مناسب، تعداد ۳۶ دسته داده در نرم‌افزار Matlab تعریف شد و سپس به نرم‌افزار Weka جهت ارزیابی منتقل گردید. جهت بیش‌تر شدن سرعت پردازش از بخش فیلتر برنامه، بهترین داده‌های موجود جدا شده و به تجزیه و تحلیل آن‌ها پرداخته شد. لازم به ذکر است در این کار از الگوریتم Best First استفاده شد. الگوریتم ذکر شده ۳۶ داده را به ۵ داده کاهش داد که باعث افزایش سرعت تجزیه و تحلیل برنامه نیز می‌گردید. لازم به ذکر است که در جهت افزایش دقت تجزیه و تحلیل داده‌ها از الگوریتم‌های متفاوت رگراسیون خطی

جدول ۱- تراکم سلولی ریزجلبک نانوکلوپسیس کشت یافته در غلظت‌های نمکی متفاوت با ۹۵ درصد اطمینان

روز	غلظت (۳۰ میلی‌گرم بر لیتر)	غلظت (۷۰ میلی‌گرم بر لیتر)	غلظت (۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)
۱	$11,81 \times 10^4 \pm 0,45 \times 10^5$	$8,56 \times 10^4 \pm 0,33 \times 10^5$	$7,41 \times 10^4 \pm 0,48 \times 10^5$
۲	$19,87 \times 10^4 \pm 0,20 \times 10^5$	$12,75 \times 10^4 \pm 0,38 \times 10^5$	$11,47 \times 10^4 \pm 0,34 \times 10^5$
۳	$36,87 \times 10^4 \pm 0,81 \times 10^5$	$37,81 \times 10^4 \pm 0,20 \times 10^5$	$33,94 \times 10^4 \pm 0,35 \times 10^5$
۴	$63,55 \times 10^4 \pm 0,36 \times 10^5$	$53,51 \times 10^4 \pm 0,46 \times 10^5$	$48,66 \times 10^4 \pm 0,47 \times 10^5$
۵	$81,45 \times 10^4 \pm 0,47 \times 10^5$	$64,73 \times 10^4 \pm 0,43 \times 10^5$	$48,67 \times 10^4 \pm 0,47 \times 10^5$
۶	$101,64 \times 10^4 \pm 0,30 \times 10^5$	$87,45 \times 10^4 \pm 0,29 \times 10^5$	$82,60 \times 10^4 \pm 0,38 \times 10^5$
۷	$281,27 \times 10^4 \pm 0,43 \times 10^5$	$217,15 \times 10^4 \pm 0,44 \times 10^5$	$160,13 \times 10^4 \pm 0,37 \times 10^5$
۸	$286,23 \times 10^4 \pm 0,38 \times 10^5$	$228,25 \times 10^4 \pm 0,45 \times 10^5$	$168,58 \times 10^4 \pm 0,48 \times 10^5$
۹	$240,16 \times 10^4 \pm 0,38 \times 10^5$	$168,58 \times 10^4 \pm 0,48 \times 10^5$	$125,86 \times 10^4 \pm 0,47 \times 10^5$

۳-۹ پردازش گوسین

پردازش گوسین بیشتر جهت پردازش تصویر به کار گرفته شده است. این فیلترها، موجب حذف نوسان‌های بالای تصویر و تولید یک تصویر از نوسان‌های پایین می‌شوند. در اثر اعمال این فیلترها روی تصویر، تصویر نرم‌یا مات می‌شود. هرچه ابعاد پنجره بزرگ‌تر باشد، میزان مات شدگی نیز افزایش می‌یابد. معمولاً این فیلترها برای از بین بردن نویز از روی تصویر استفاده می‌شوند. از جدول ۳ ضریب همبستگی ۰,۷۳، میانگین خطای مطلق ۳۹۷۱۶ و میانگین مربع خطا ۵۲۹۵۴ مشاهده می‌شود که از میان داده‌های آماری مذکور ضریب همبستگی قابل قبولی توسط سامانه به دست نیامد.

۴-۹ رگراسیون خطی ساده

اجرای یک مدل رگراسیون با تعریف مدل رگراسیون امکان‌پذیر است. همان‌طور که از جدول ۳ پیداست، می‌توان به این نتیجه رسید که الگوریتم ذکر شده به دلیل داشتن ضریب همبستگی ۰,۹، میانگین خطای مطلق ۲۷۷۴۵ و میانگین مربع خطای ۳۲۲۴۴ از الگوریتم رگراسیون خطی بهتر است.

الگوریتم‌های رگراسیون خطی ساده، رگراسیون خطی، پرسپترون چندلایه و پردازش گوسین که به ترتیب دارای ضریب همبستگی ۰,۹۰۹۵، ۰,۹۰۳۹، ۰,۸۶۲۳ و ۰,۷۳۳۵ است، بیانگر این موضوع هستند که سامانه توانسته دقت قابل قبولی ارائه دهد. کمترین خطا مربوط به الگوریتم رگراسیون خطی ساده با ۳۲۲۴۴,۵۴ و بیشترین خطا مربوط به الگوریتم پرسپترون چندلایه با ۷۹۸۶۴,۷۰ بود.

۵-۹ شبکه عصبی مصنوعی

جهت انجام آزمون این بخش از نرم‌افزار Matlab برای پیش‌بینی استفاده شد. این شبکه‌ها برای تخمین و تقریب کارایی بسیار بالایی از خود نشان داده‌اند. با استفاده از برنامه‌نویسی رایانه می‌توان ساختار داده‌ای طراحی کرد که همانند یک نرون عمل

جدول ۲- نرخ رشد ویژه ریزجلبک در غلظت‌های نمکی متفاوت

۳۰ میلی‌گرم بر لیتر	۷۰ میلی‌گرم بر لیتر	۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر
$13,40 \pm 0,005$	$13,17 \pm 0,033$	$12,91 \pm 0,011$

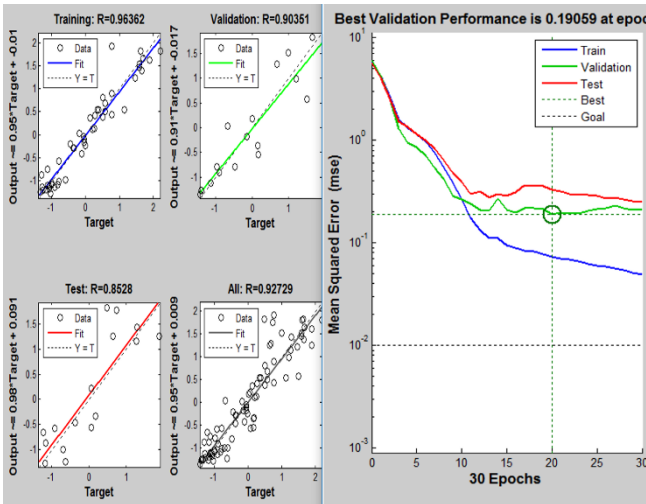
جدول ۳- نرخ رشد ویژه ریزجلبک در سطوح دمایی متفاوت

روش محاسبه	ضریب همبستگی	میانگین مطلق خطا	میانگین مربع خطا	خطا نسبی مطلق (%)	مربع خطا نسبی (%)
الگوریتم رگراسیون خطی	۰,۹۰	۲۸۶۳۴	۳۳۱۳۱	۴۳	۴۴
الگوریتم پرسپترون چندلایه	۰,۸۶	۶۹۰۱۷	۷۹۸۶۴	۱۰۴	۱۰۵
الگوریتم گوسین	۰,۷۳	۳۹۷۱۶	۵۲۹۵۴	۶۰	۷۰
الگوریتم رگراسیون خطی ساده	۰,۹۰	۲۷۷۴۵	۳۲۲۴۴	۴۲	۴۲

۲-۹ الگوریتم پرسپترون چندلایه

بر خلاف پرسپترون‌های یکتا، شبکه‌های چندلایه می‌توانند برای یادگیری مسائل غیرخطی و همچنین مسائلی با تصمیم‌گیری‌های متعدد به کار روند. در این قسمت نیز به دلیل اینکه صورت سؤال غیرخطی است از این شبکه جهت آموزش و یادگیری استفاده شده است. همان‌طور که از جدول ۳ مشاهده می‌شود، نتایج مقدار ضریب همبستگی ۰,۸۶، میانگین خطای مطلق ۶۹۰۱۷ و میانگین مربع خطای ۷۹۸۶۴ را نشان داد.

نماید. سپس با ایجاد شبکه‌ای از این نرون‌های مصنوعی بهم‌پیوسته، ایجاد یک الگوریتم آموزشی برای شبکه و با اعمال این الگوریتم به شبکه آن را آموزش داد. در این بخش تمامی نرون‌های ذکرشده آزمایش گردید و پس از ارزیابی، بهترین شبکه با تعداد ۸ نرون مشخص شد. در سمت راست شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مناسب‌ترین تکرار که سبب بهترین کارایی و کمینه‌شدن میانگین مربع خطا می‌شود، مشخص شده است. تکرار بیشتر سبب واگرایی و افزایش خطای محاسبه می‌شود. تعداد داده‌های آموزش ۵۰ داده، معتبرسازی ۱۷ داده و آزمایش ۱۷ داده بود. همچنین داده‌های آموزش با سه بار تکرار محاسبه شد که در مجموع ۱۵۰ داده آموزش برای تحلیل شبکه عصبی تعداد مورد قبولی است.

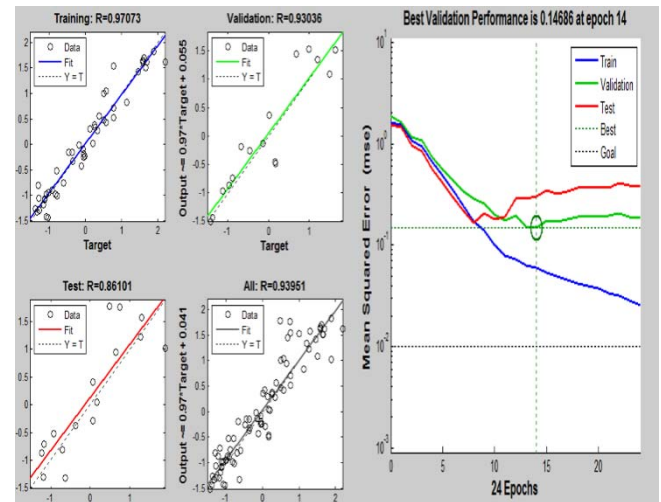


شکل ۱۲ - نتایج شبکه عصبی برای نمونه حاوی ۱۰۰ گرم بر لیتر نمک

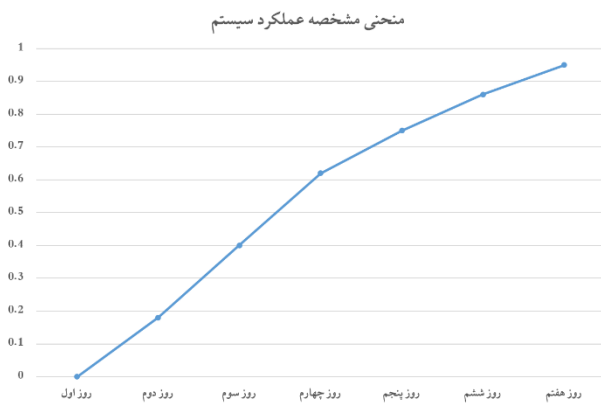
مقدار R معرف رابطه عددی بین خروجی و هدف است. اگر $R=1$ باشد، نشان‌دهنده یک رابطه دقیق و مناسب خطی بین خروجی و ورودی است. هرچه R به سمت صفر میل کند این رابطه غیرخطی می‌شود. شکل ۱۳ نمایش‌دهنده منحنی مشخصه عملکرد سیستم برای برداشت ویژگی‌های تصویر ریزجلبک است.

جدول ۴ - مقایسه دقت نتایج

روش	تصاویر آزمایش شده	دقت (%)
ویژگی‌های آماری مرتبه اول و دوم	۲۲۰	۸۲٫۷۳
شبکه عصبی مصنوعی	۱۸۹	۹۱٫۸۲

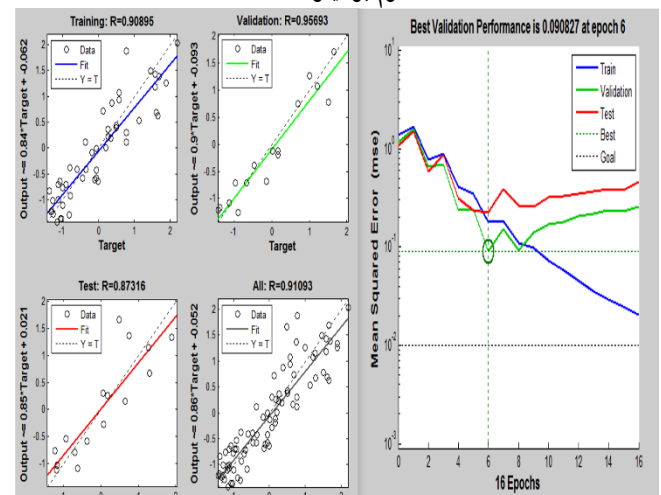


شکل ۱۰ - نتایج روش شبکه عصبی مصنوعی برای نمونه دارای ۳۰ گرم بر لیتر نمک



شکل ۱۳ - منحنی مشخصه عملکرد سیستم برای برداشت ویژگی تصویر

نتایج روش شبکه عصبی مصنوعی با روش ویژگی‌های آماری مرتبه اول و دوم پژوهش لکشمی و همکاران [۱۹] مقایسه شده‌اند. نتایج حکایت از دقت بالاتر روش مورد استفاده در پژوهش حاضر دارد.



شکل ۱۱ - نتایج شبکه عصبی برای نمونه حاوی ۷۰ گرم بر لیتر نمک

نمودار رگرسیون نمایش‌دهنده رابطه بین خروجی شبکه و هدف می‌باشد. اگر داده‌های آموزش مناسب باشد، خروجی شبکه و هدف باید یکی باشد. بهترین نتیجه به صورت خط چین و نزدیک‌ترین خط رگرسیونی به صورت خط کامل در سمت چپ شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

۱۰- نتیجه‌گیری کلی

منابع

- از میان پارامترهای موثر و مختلف افزایش کشت نسل سوم زیست‌توده از ریزجلبک‌ها، میزان غلظت شوری آب است. در این مطالعه میزان رشد نانوکلوپسیس از گونه اوکولاتا به‌عنوان یکی از زیست‌توده‌های حاوی لیپید بالا به عنوان حامل انرژی و به‌منظور تولید دیزل زیستی با درصد تبدیل بالا در غلظت‌های نمکی مختلف با دوره نوری ثابت مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مطالعه حاضر نشان داد که نوسانات ایجاد شده در غلظت‌های مختلف نمکی اثرات معناداری بر روی رشد و تراکم سلول‌های ریزجلبک اوکولاتا می‌تواند ایجاد نماید. به‌گونه‌ای که تراکم سلول‌های ریزجلبک در غلظت نمک ۳۰ گرم بر لیتر در طول دوره پرورش مطابق با مقاله ملکوتیان و همکاران [۱۸] بیشتر از تراکم به‌دست‌آمده در غلظت‌های نمکی ۷۰ و ۱۰۰ گرم بر لیتر بود. در این تحقیق هدف اصلی امکان‌سنجی تخمین میزان رشد ریزجلبک با استفاده از تکنیک پردازش تصویر بود. برای رسیدن به این هدف از ماشین بینایی و آنالیز رنگ‌ها استفاده شد. به‌طورکلی الگوریتم‌های پیشنهادی در جهت پیش‌بینی دقت داده‌های بدست آمده و پاسخ به سؤال اینکه می‌توان بر اساس رنگ و به کمک پردازش تصویر رشد ریزجلبک را در شرایط‌های محیطی متفاوت تخمین زد، به‌خوبی عمل کرد. به ترتیب الگوریتم‌های رگرسیون خطی ساده، رگرسیون خطی، پرسپترون چندلایه و پردازش گوسین که دارای ضرایب همبستگی ۰٫۹۰۹۵، ۰٫۹۰۳۹، ۰٫۸۶۲۳ و ۰٫۷۳۳۵ است، نتایج خوبی را نشان دادند. در میان داده‌های آماری، مربع میانگین خطا نیز به‌اندازه دقت یا ضریب همبستگی مهم است. در میان نتایج نشان داده‌شده کمترین خطا مربوط به الگوریتم رگرسیون خطی ساده با ۳۲۲۴۴٫۵۴ و بیشترین خطا مربوط به الگوریتم پرسپترون چندلایه با ۷۹۸۶۴٫۷۰ است. تمامی نتایج ذکرشده با استفاده از برنامه تجزیه و تحلیل Weka به دست آمدند. همچنین در این تحقیق از شبکه عصبی مصنوعی برنامه Matlab نیز استفاده شد که می‌توانست با استفاده از تعداد مختلف نرون‌های لایه مخفی بهترین دقت و کمترین خطا را به دست آورد. در اینجا از هشت نرون استفاده گردید که بیشترین مقدار دقت و کمترین میزان خطا به ترتیب ۰٫۹۳۹۵۱ و ۰٫۱۴۶۸۶ بود نتایج حاکی از آن بود که روش شبکه عصبی مصنوعی یک روش موفقیت‌آمیز در جهت تخمین رشد ریزجلبک است. به‌عنوان یک نتیجه کلی می‌توان اعلام کرد سامانه پردازش تصویر، پیش‌بینی تأثیر عامل غلظت نمکی آب بر رشد ریزجلبک را می‌تواند با بیشترین دقت و کمترین خطا انجام دهد.
- [1] A. Yousuf, *Microalgae Cultivation for Biofuels Production*. Elsevier Science & Technology, 2019.
- [2] J. Ren, A. Scipioni, A. Manzardo, and H. Liang, *Biofuels for a More Sustainable Future: Life Cycle Sustainability Assessment and Multi-Criteria Decision Making*. Elsevier Science, 2019.
- [3] J. Zhang, *Transport and Energy Research: A Behavioral Perspective*. Elsevier, 2019.
- [4] A. Zahedi, M. Mirabdoli, and A. Shayan Nezhad, "Commercial optimization of biodiesel production from rapeseed oil as a clean fuel for thermal power plants," (in eng), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 9, pp. 135-142, 2016.
- [5] A. Zahedi, S. A. Amirkhilili, and A. Ghaffari Nejad, "Lab Scale Production of Wind Power-Fuel Cell Hybrid Systems by Use of Electrolysis Process and Study of Technical Analysis," (in eng), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 16, no. 12, pp. 425-432, 2017.
- [6] A. Zahedi, H. Timasi, A. Kasaean, and S. A. Mirnezami, "Design and construction of a new dual CHP-type renewable energy power plant based on an improved parabolic trough solar collector and a biofuel generator," *Renewable energy*, vol. 135, pp. 485-495, 2019.
- [7] A. S. Nejad and A. R. Zahedi, "Optimization of biodiesel production as a clean fuel for thermal power plants using renewable energy source," *Renewable energy*, vol. 119, pp. 365-374, 2018.
- [8] M. Tabatabaei et al., "Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 74, pp. 239-303, 2019.
- [9] C. Posten and S. F. Chen, *Microalgae Biotechnology*. Springer International Publishing, 2015.
- [10] M. Jan and P. Kazik, *Nannochloropsis: Biology, Biotechnological Potential and Challenges*. Nova Science Publishers, Incorporated, 2017.
- [11] M. H. Sarrafzadeh et al., "Microalgae biomass quantification by digital image processing and RGB color analysis," *Journal of applied phycology*, vol. 27, no. 1, pp. 205-209, 2015.
- [12] Y. Hendrawan and H. Murase, "Neural-intelligent water drops algorithm to select relevant textural features for developing precision irrigation system using machine vision," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 77, no. 2, pp. 214-228, 2011.
- [13] A. Wang, W. Zhang, and X. Wei, "A review on weed detection using ground-based machine vision and image processing techniques," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 158, pp. 226-240, 2019.
- [14] E. Daneshvar, C. Santhosh, E. Antikainen, and A. Bhatnagar, "Microalgal growth and nitrate removal efficiency in different cultivation conditions: Effect of macro and micronutrients and salinity," *Journal of*

- [20] G. Attaran Fariman, M. Roozitalab, H. Zadabas Shahabadi, and S. Sharifian, "Effects of salinity on growth and fatty acid composition of green microalgae *Dunaliella bardawil* as a candidate source for biofuel production," (in eng), *Journal of Aquatic Ecology*, Research vol. 4, no. 3, pp. 61-50, 2015.
- [21] N. R. Shaikh, "One pic Smoothing of a Noisy Image Using Different Low Pass Filters."
- [22] D. I. Patrício and R. Rieder, "Computer vision and artificial intelligence in precision agriculture for grain crops: A systematic review," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 153, pp. 69-81, 2018.
- [23] R. Lukac and K. N. Plataniotis, *Color Image Processing: Methods and Applications*. CRC Press, 2018.
- [24] N. Teimouri, M. Omid, K. Mollazade, and A. Rajabipour, "A novel artificial neural networks assisted segmentation algorithm for discriminating almond nut and shell from background and shadow," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 105, pp. 34-43, 2014.
- Environmental Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 1848-1854, 2018.
- [15] A. R. Zahedi and M. Rashvand M., "Feasibility of Optimum Temperature for Growth of *Nannochloropsis Oculata* Microalga by Using Image Processing System," (in eng), *Modares Journal of Biotechnology*, vol. 9, no. 1, pp. 117-122, 2017.
- [16] M. Malakootian and B. Hatami, "Determination of optimal temperature of *Nannochloropsis oculata* microalgae for biofuel production (biodiesel)," *Energy Engineering & Management*, vol. 4, no. 1, pp. 62-69, 2014.
- [17] S. Lakshmi and R. Sivakumar, "Chlorella Algae Image Analysis Using Artificial Neural Network and Deep Learning," in *Biologically Rationalized Computing Techniques For Image Processing Applications*: Springer, 2018, pp. 215-248.
- [18] Z. Ali Reza and R. Mehdi, "Fuzzy Optimization Approach for the Synthesis of Polyesters and Their Nanocomposites in In-Situ Polycondensation Reactors," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 56, no. 39, pp. 11245-11256, 2017.
- [19] A. Souliès, J. Pruvost, C. Castelain, and T. Burghelea, "Microscopic flows of suspensions of the green non-motile *Chlorella* micro-alga at various volume fractions: Applications to intensified photobioreactors," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 231, pp. 91-101, 2016.



سینا لطفی مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته‌های مهندسی مکانیک و مهندسی سیستم‌های انرژی گرایش محیط زیست از دانشگاه علم و صنعت اخذ نوده‌اند. ایشان هم اکنون در مقطع دکتری تخصصی در رشته مهندسی سیستم‌های انرژی گرایش فناوری انرژی در دانشگاه تهران مشغول به تحصیل می‌باشند. زمینه‌های تحقیقاتی وی سوخت‌های زیستی، ریزجلبک‌ها و پیل‌های سوختی زیستی است.



علیرضا زاهدی مدرک کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را از دانشگاه امیرکبیر دریافت نمود. ایشان هم اکنون به عنوان عضو هیأت علمی در دانشگاه علم و صنعت دانشکده فناوری نوین مشغول به کار است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان سیستم‌های انرژی می‌باشد.