

تشخیص آلودگی فلز سنگین مس در آب شرب به کمک زیست‌پایش مبتنی بر یادگیری عمیق

آزاده آشوری[†] و حمیدرضا پوررضا[‡]

آزمایشگاه بینایی ماشین، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

[†] azadeh.ashoori@mail.um.ac.ir

[‡] hpourreza@um.ac.ir

روش زیست‌پایش^۱ یا نظارت زیست‌شناسانه یکی از انواع نظارت در زمان واقعی است. این روش با نظارت بر تغییر وضعیت سلامت، خصوصیات فیزیولوژیکی و پاسخ‌های رفتاری یک یا جمعیتی از موجودات، روشی موثر برای ارزیابی کیفیت آب را ارائه می‌کند [۲]. در فرآیند زیست‌پایش از شاخص‌های زیستی متفاوتی استفاده می‌شود. حساسیت بالای ماهی‌ها به کیفیت آب موجب شده که اغلب به عنوان عامل شناسایی وجود مواد سمی ناشی از یک یا چند آلاینده مورد استفاده قرار گیرند [۳]. استفاده از رویکرد زیست‌پایش و به کارگیری فناوری بینایی ماشین، می‌تواند موجب شناسایی تغییرات رفتاری این موجود زنده تحت تاثیر آلودگی‌های مختلف شده و با استفاده از روش مناسب طبقه‌بندی، شناسایی وجود مواد سمی، آلودگی‌ها و هم‌چنین میزان غلظت آن‌ها در آب فراهم شود. در تشخیص آلودگی آب با رویکرد زیست‌پایش مبتنی بر ماهی از گونه‌های متفاوتی از ماهی‌ها مانند زبرافیش [۶-۲]، گلدفیش [۷-۹]، تیلاپیا [۱۰]، مداکا [۱۱-۱۳]، سرخو [۱۴] و گویی [۱۱] استفاده شده است. آلاینده‌هایی که مورد مطالعه قرار گرفته‌اند نیز شامل مس [۴-۲، ۸، ۱۲]، جیوه، کروم، کادمیوم [۲، ۸، ۱۵]، پتاسیم سیانید، سدیم سیانید و آلدیکارب [۱۱] هستند.

به طور کلی ساختار سامانه‌های زیست‌پایش مبتنی بر تحلیل رفتار ماهی که تاکنون ارائه شده، شامل بخش‌های پیش‌پردازش، استخراج ویژگی و طبقه‌بندی می‌باشد. از جمله پیش‌پردازش‌های بکار رفته در مطالعات پیشین می‌توان به بهبود کنتراست [۲، ۳، ۷، ۱۰]، حذف نویز [۲، ۱۰، ۱۴]، تفریق پس‌زمینه [۷، ۱۹-۱۶] و تقطیع تصویر [۱۴، ۱۶] جهت تشخیص ماهی‌ها، تبدیل فضای رنگی [۴]، تنظیم وفقی نور، تراز رنگ سفید^۲ و مدل‌سازی پس‌زمینه [۳، ۱۴] اشاره کرد. در مقاله‌های [۸، ۹] با استفاده از شبکه عصبی عمیق Mask-RCNN تقطیع تصویر جهت تشخیص محل ماهی‌ها انجام می‌گیرد. سپس مختصات مرکز ماهی استخراج

چکیده- نظر به اهمیت جایگاه آب در زندگی بشر، پایش مستمر سلامت آن یک امر حیاتی محسوب می‌شود. روش‌های مختلفی جهت نظارت بر سلامت آب وجود دارد. در این مقاله روشی جهت تشخیص آلودگی فلز سنگین مس در آب شرب به کمک زیست‌پایش مبتنی بر شبکه عصبی عمیق و تکنیک‌های بینایی ماشین و پردازش تصویر ارائه می‌شود. به دلیل حساسیت بالای ماهی به کیفیت آب، این موجود به عنوان عامل شناسایی آلودگی در نظر گرفته شد. پاسخ‌های رفتاری ماهی‌ها، توسط دوربین تعبیه شده در مجاور تانک ثبت شده و استخراج ویژگی از تصاویر با استفاده از معماری سه‌گانه مبتنی بر شبکه عصبی عمیق انجام می‌گیرد. جهت طبقه‌بندی نهایی ویژگی‌های استخراج شده نیز از یک شبکه ساده تماماً متصل استفاده می‌شود. بر اساس نتایج حاصل شده، این سامانه با صحت بالای ۹۷ درصد قادر به تشخیص آلودگی فلز سنگین مس موجود در آب شرب است.

کلمات کلیدی- بینایی ماشین، پردازش تصویر، تشخیص آلودگی آب، زیست‌پایش، یادگیری عمیق

۱. مقدمه

آب شیرین یک منبع محدود است که برای کشاورزی، صنعت و البته وجود بشر ضروری است. به دلیل متنوع بودن منابع آبی، انواع مختلفی از آلودگی‌های مرتبط با آب وجود دارند که می‌توانند آب را به عامل و ناقل بسیاری از بیماری‌ها تبدیل کنند [۱].

با توجه به اهمیت جایگاه آب در زندگی بشر، پایش سلامت آن یک امر واجب محسوب می‌گردد. فناوری‌های مختلفی جهت پایش سلامت آب وجود دارند که عبارتند از: فناوری‌های تشخیص آزمایشگاهی، فناوری‌های نظارت از راه دور، فناوری‌های تشخیص سریع میدانی و فناوری‌های نظارت زمان واقعی خودکار و مداوم.

² White balance

¹ Bio-monitoring

بند SVM است، که به دو صورت دو کلاسه [۴، ۱۹] و چند کلاسه [۲] استفاده شده است. افزون بر این، شبکه عصبی احتمالی (PNN)^{۱۲} [۲۰]، طبقه‌بند خطی نرمال بیز^{۱۳} [۱۷]، شبکه‌ی پرسپترون چند لایه^{۱۴} [۱۲، ۲۳] و لایه اتصال کامل موجود در آخرین لایه‌ی یک شبکه عصبی پیچشی کم عمق [۶]، شبکه عمیق LSTM [۳] و مدل حاصل از ادغام دو طبقه‌بند SVM و^{۱۵} XGBoost [۱۵] نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند. علاوه بر روش‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی، روش‌های آماری نیز برای تجزیه و تحلیل داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به آزمون تحلیل واریانس یک طرفه^{۱۶} [۱۱، ۱۳، ۲۴، ۲۶]، آزمون لون^{۱۷} و آزمون دانت^{۱۸} [۱۳] اشاره کرد. نرم‌افزارهای آماری استفاده شده عموماً شامل SAS [۷] و SPSS [۲۴] هستند.

هدف از این مقاله، توسعه‌ی یک روش تشخیص آلودگی فلز سنگین مس در آب شرب به کمک زیست‌پایش مبتنی بر رفتار ماهی است، به طوری که گام استخراج ویژگی در این روش تنها از طریق آموزش یک شبکه عصبی عمیق سه گانه و طبقه‌بندی این ویژگی‌ها توسط یک شبکه ساده تماماً متصل صورت می‌گیرد.

در ادامه، بخش (۲) به ارایه روش پیشنهادی، بخش (۳) به آزمایش و ارزیابی روش پیشنهادی و نهایتاً بخش (۴) به نتیجه‌گیری می‌پردازد.

۲. روش پیشنهادی

روش پیشنهاد شده در این مقاله شامل سه گام اصلی پیش پردازش، استخراج ویژگی و طبقه‌بندی می‌باشد. شکل (۱) بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی را نشان می‌دهد. خروجی نهایی مرحله‌ی پیش پردازش جریان نوری مربوط به هر دو فریم متوالی بوده و به عنوان ورودی گام استخراج ویژگی در نظر گرفته می‌شود. استخراج ویژگی با استفاده از یک شبکه عصبی عمیق سه گانه و مبتنی بر رویکرد یادگیری متریک^{۱۹} صورت می‌گیرد. در نهایت، طبقه‌بندی ویژگی‌های استخراج شده از هر تصویر توسط یک شبکه عصبی ساده تماماً متصل صورت می‌گیرد. در ادامه، به بررسی کامل هر گام پرداخته می‌شود.

ارزیابی اثر آلودگی بر رفتار ماهی‌ها یا بصورت انفرادی و یا جمعیتی انجام می‌شود. تحلیل رفتار ماهی بصورت انفرادی عموماً مبتنی بر ردیابی است. برای ردیابی ماهی از الگوریتم‌های مختلفی چون افزونه‌ی ردیاب چندگانه^{۲۰} [۲۰]، فیلتر کالمن^{۲۱} [۹، ۱۴، ۱۵، ۱۸]، روش ردیابی مبتنی بر مرکز ثقل [۱۹]، ردیاب مبتنی بر کوواریانس [۲۱]، جریان نوری^{۲۲} [۳] و KCF^{۲۳} [۱۵] استفاده شده است. در مقاله [۱۴] برای بهبود ردیابی ماهی‌ها و کاهش انطباق‌های نادرست بین دو ماهی در دو فریم متوالی، یک ماتریس رابطه بین فریمی^{۲۴} تعریف می‌شود که درایه‌های آن بر اساس اختلاف ویژگی‌هایی از قبیل مکان، جهت و ناحیه بین دو ماهی در دو فریم متوالی بدست می‌آید. در مقاله [۸] مسیر حرکت ماهی در یک بازه‌ی زمانی مشخص محاسبه می‌شود. تصاویر بدست آمده از مسیر حرکت ماهی‌ها در دو دسته‌ی نرمال و غیرنرمال قرار می‌گیرند و جهت آموزش شبکه DenseNet^{۲۵} به عنوان طبقه‌بند، استفاده می‌شوند. اما در تحلیل رفتار جمعیتی، می‌توان به مرکز ثقل جمعیت ماهی‌ها [۴-۲، ۷، ۲۲]، انحراف معیار مکانی ماهی‌ها [۲-۴، ۷، ۲۲]، میانگین سرعت ماهی‌ها [۴-۲، ۱۰، ۲۳]، شتاب [۱۹] و شتاب زاویه‌ای [۱۳]، فاصله‌ی افقی و فاصله‌ی عمودی [۲۰، ۲۴]، مسیر حرکت ماهی‌ها [۲۲، ۲۳، ۲۵]، تعداد و مدت زمان توقف [۲۳]، نرخ چرخش^{۲۶} و میزان چرخش (تغییر زاویه) تقسیم بر طول مسیر^{۲۷} [۲۳] و زاویه چرخش [۳] اشاره کرد. از تغییرات کمی در رنگ بدن ماهی نیز به عنوان یک شاخص غیرمستقیم برای ارزیابی کیفیت آب استفاده شده است [۳، ۴]. در مقاله [۱۵] نیز بر اساس مسیر بدست آمده از حرکت ماهی، پارامترهای بارز رفتار حرکتی ماهی که شامل سرعت، شتاب، خمیدگی، فاصله شنا از مرکز، پراکندگی و غیره است، را بدست آوردند و از طرف دیگر جهت استخراج ویژگی‌های عمیق از تصویر مسیر حرکت سه بعدی برای آموزش مدل پوینت نت^{۲۸} استفاده کردند. در مقاله [۹] از مسیرهای نرمال و غیرنرمال محاسبه شده برای آموزش یک شبکه عصبی CNN به عنوان طبقه‌بند استفاده می‌شود.

آخرین بخش سامانه زیست‌پایش، طبقه‌بندی است که برچسب سالم/آلوده را به آب می‌دهد. برای این بخش، از طبقه‌بندهای باناظر استفاده شده است. یکی از طبقه‌بندهای مورد استفاده، طبقه

¹² Probabilistic neural network

¹³ Linear Normal Bayes

¹⁴ Multi-layer perceptron network

¹⁵ Extreme Gradient Boosting

¹⁶ ANOVA

¹⁷ Levene's test

¹⁸ Dunnett's test

¹⁹ Metric-learning

³ MultiTracker

⁴ Kernelized Correlation Filters

⁵ Optical flow

⁶ Kernelized Correlation Filters

⁷ Interframe relationship matrix

⁸ Densely connected convolution network

⁹ Turning rate (rad/s)

¹⁰ Meander (rad/mm)

¹¹ Pointnet

ایده اصلی شبکه‌های سه‌گانه، نگاشت داده‌ها به فضایی است که فاصله در آن فضا، معیاری برای اندازه‌گیری شباهت معنایی است. به عبارتی، اساس کار چنین شبکه‌هایی یاد گرفتن ویژگی‌هایی از تصاویر دو کلاس است، به گونه‌ای که فاصله‌ی موجود بین ویژگی‌های مربوط به تصاویر هم‌کلاس کم و فاصله‌ی بین ویژگی‌های تصاویر دو کلاس مختلف از یکدیگر زیاد شود. شبکه سه‌گانه سه ورودی با نام‌های لنگر^{۲۲}، مثبت و منفی می‌گیرد، که به این سه ورودی در کنار هم سه‌گانه گفته می‌شود. تصویر مثبت، تصویری هم‌کلاس با تصویر لنگر و تصویر منفی، تصویری از کلاسی متفاوت است.

چنین شبکه‌هایی از منظر زمان ساخت مجموعه داده سه‌گانه‌ها شامل دو رویکرد برخط و برون‌خط هستند. در حالت برون‌خط پیش از شروع فاز آموزش، سه‌گانه‌های ورودی شبکه بر اساس معیارهایی چون فاصله‌ی اقلیدسی تصاویر استخراج می‌شوند. در حالت برخط سه‌گانه‌های مورد نظر در هر دسته^{۲۳}، بر اساس فاصله‌ی ویژگی‌های استخراج شده توسط شبکه و برچسب داده‌های آن دسته استخراج می‌شوند.

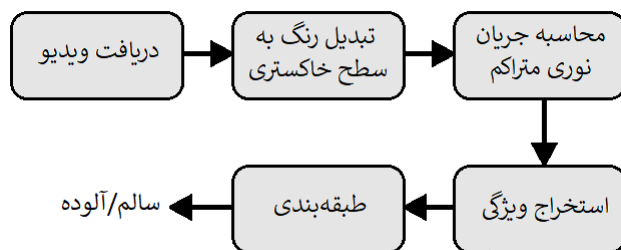
بهینه‌سازی مدل با استفاده از تابع ضرر سه‌گانه^{۲۴} انجام می‌گیرد. این تابع ضرر بر اساس معادله (۱) بدست می‌آید.

$$\text{Tripletloss} = \max (\|f(x^a) - f(x^p)\|_2^2 - \|f(x^a) - f(x^n)\|_2^2 + \alpha, 0) \quad (1)$$

که در آن $f(x^a)$ ، $f(x^p)$ ، $f(x^n)$ به ترتیب ویژگی‌های مربوط به تصویر لنگر، مثبت و منفی، و α مولفه‌ی حاشیه^{۲۵} می‌باشد.

بهینه‌سازی مدل با تابع ضرر فوق سبب تولید ویژگی‌های متمایز و کاملاً تفکیک شده‌ای در فضای اقلیدسی می‌شود.

در روش پیشنهادی از یک شبکه سه‌گانه مبتنی بر شبکه عمیق از پیش آموزش دیده Resnet101 استفاده شده است. با توجه به اینکه رویکرد برخط از سرعت و قابلیت اعتماد بالاتری برخوردار است، در این مقاله سه‌گانه‌ها مبتنی بر رویکرد برخط و حین آموزش شبکه ساخته شدند. جهت استخراج سه‌گانه‌ها در هر دسته از تصاویر ورودی شبکه، به ازای هر تصویر لنگر، یک تصویر مثبت با بیشترین فاصله^{۲۶} از آن و یک تصویر منفی با کمترین فاصله^{۲۷} از آن انتخاب می‌شود. در نهایت بر اساس میانگین تابع ضرر اعمال شده بر روی تمامی سه‌گانه‌ها، آموزش شبکه و یادگیری ویژگی‌های متمایز از تصاویر دو کلاس آب سالم و آب آلوده صورت می‌گیرد.



شکل ۱: بلوک دیاگرام سیستم پیشنهادی

۲-۱- پیش‌پردازش

در این مرحله، ابتدا فیلم‌های ضبط شده با نرخ ۳۰ فریم بر ثانیه، به مجموعه‌ای از فریم‌ها تبدیل شدند. با توجه به این که اطلاعات رنگ مربوط به بدن ماهی‌ها معیار مناسبی برای یک سیستم با پاسخ‌دهی در زمان واقعی نبوده و قابل چشم‌پوشی است، در گام بعدی فریم‌های حاصل شده از فضای رنگی RGB به تصاویر سطح خاکستری تبدیل شدند. از آنجایی که ردیابی ماهی‌ها در کارهای پیشین با دشواری‌های بسیاری مثل از دست رفتن هدف در فریم‌های بعدی رو به رو بود، در این مقاله بجای استفاده از الگوریتم‌هایی جهت ردیابی تک به تک هر ماهی و یافتن مسیر، از روش جریان نوری متراکم^{۲۰} استفاده شده است. در نتیجه تغییرات حرکتی (رفتاری) که شامل مقدار حرکت و جهت حرکت در دو راستای افقی و عمودی است، برای تمام ماهی‌ها و به طور هم‌زمان در هر دو فریم متوالی و در قالب یک تصویر جدید محاسبه شد. در نهایت سایز تصاویر حاصل به 128×128 تغییر داده شد.

۲-۲- استخراج ویژگی

از آنجایی که محاسبه‌ی ویژگی‌ها به صورت دستی سر بار محاسباتی و پیچیدگی بالایی دارد، هدف این مقاله استخراج ویژگی مبتنی بر شبکه عصبی عمیق می‌باشد. در این گام از تصاویر حاصل از اعمال جریان نوری بر روی فریم‌های دو کلاس کنترل و آزمایش، به عنوان داده‌ی ورودی شبکه‌ی عصبی عمیق و در جهت استخراج ویژگی‌های متمایز کننده بین این دو کلاس استفاده شد.

از آنجایی که تصاویر جریان نوری دو کلاس کنترل و آزمایش از شباهت بالایی برخوردار بودند، شبکه عمیق سه‌گانه^{۲۱} و مبتنی بر رویکرد یادگیری متریک جهت یادگیری ویژگی‌های عمیق مورد استفاده قرار گرفت.

²⁴ Triplet loss

²⁵ Margin

²⁶ Hard positive

²⁷ Hard negative

²⁰ Dense optical flow

²¹ Triplet

²² Anchor

²³ Batch

با توجه به این که اکثر هزینه‌ی زمانی و محاسباتی روش پیشنهادی در گام استخراج ویژگی صورت گرفته است، گام طبقه‌بندی با استفاده از یک شبکه تماماً متصل ساده قابل انجام است. این شبکه شامل یک لایه‌ی تماماً متصل با یک نورون خروجی بوده است. تابع ضرر به کار رفته در این شبکه آنتروپی متقاطع دودویی^{۲۸} بوده و بهینه‌سازی این طبقه‌بند دودویی را فراهم نموده است. بنابراین ورودی شبکه طبقه‌بند، ویژگی‌های استخراج شده در گام پیشین بوده و خروجی آن برچسب آب سالم یا آب آلوده می‌باشد.

۳. آزمایش و ارزیابی روش پیشنهادی

از آنجایی که مجموعه داده عمومی برای ارزیابی سامانه‌های زیست‌پایش مبتنی بر ماهی وجود ندارد، در این تحقیق ابتدا مجموعه داده‌ای برای آموزش و آزمایش روش ارایه شده تهیه گردید و سپس الگوریتم طراحی شده بر روی آن، مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفت.

۳-۱- تهیه‌ی مجموعه داده

اولین گام تهیه‌ی مجموعه داده‌ای مناسب می‌باشد. بدین منظور یک آکواریوم با یک دیواره جداکننده‌ی کنترل و آزمایش طراحی شد، در نتیجه تمام شرایط محیطی از جمله نور محیط، دما و PH آب در هر دو سمت یکسان و تنها پارامتر متغیر مسئله، وجود یا عدم وجود آلودگی شیمیایی بوده است. گونه‌ی ماهی مورد استفاده زبرافیش بوده است، زیرا این گونه ماهی از نظر ساختار زیست‌شناسانه شباهت بسیار زیادی به انسان دارد. به منظور مطالعه رفتار جمعی، تعداد ماهی‌های مورد استفاده در هر سمت ۳۰ عدد در نظر گرفته شد. حجم آب به کار رفته در هر سمت ۱۲/۵ لیتر بوده است. ماهی‌ها جهت انطباق با محیط، به مدت یک تا دو هفته در شرایط عادی نگهداری شدند. به منظور ایجاد آلودگی از فلز سنگین مس با غلظت ۱/۴۷۲ میلی گرم بر لیتر استفاده شد. تصویربرداری با استفاده از یک دوربین و از نمای کناری تانک انجام شد. مدت زمان فیلم برداری از دو فاز کنترل و آزمایش ۳۰ دقیقه بوده و با نرخ ۳۰ فریم بر ثانیه انجام گرفت.

معیارهای متفاوتی برای ارزیابی یک سیستم وجود دارد. یکی از معیارهای مهم ارزیابی این سامانه، میزان منفی کاذب^{۲۹} است. پاسخ منفی به این معنا است که سیستم نمونه آب آلوده را سالم تشخیص داده است، بنابراین برای کاهش خطرهای احتمالی ناشی از آلودگی آب بایستی سیستم طراحی شده از حداقل میزان منفی کاذب برخوردار باشد. گرچه معیار مثبت کاذب^{۳۰} نسبت به معیار منفی کاذب از ریسک کمتری برخوردار است، از این معیار نیز می‌توان برای ارزیابی سیستم استفاده کرد. در کنار این دو معیار گفته شده، معیار مثبت صحیح^{۳۱} و منفی صحیح^{۳۲} نیز محاسبه شده و بر اساس این چهار معیار، معیارهای حساسیت^{۳۳}، تشخیص^{۳۴} و صحت^{۳۵} برای ارزیابی روش پیشنهادی استفاده شد. حساسیت، حاصل تقسیم موارد مثبت واقعی به حاصل جمع موارد مثبت واقعی و موارد منفی کاذب است. تشخیص، حاصل تقسیم موارد منفی واقعی به حاصل جمع موارد منفی واقعی و مثبت کاذب است. صحت نیز حاصل تقسیم موارد صحیح به حاصل جمع تمام خروجی‌های سیستم است.

۳-۳- نتایج حاصل از ارزیابی

این بخش شامل جزئیات پیاده‌سازی روش پیشنهادی و نتایج حاصل از ارزیابی می‌باشد. پیاده‌سازی این روش مبتنی بر نسخه ۳/۸ پایتون بوده و با استفاده از کتابخانه‌های OpenCV و PyTorch انجام گرفته است.

جهت ایجاد مجموعه داده‌ی آموزشی، اعتبارسنجی و آزمون، ۷۰ درصد از تصاویر مجموعه داده برای فاز آموزش، ۱۵ درصد برای اعتبارسنجی و ۱۵ درصد باقی‌مانده برای فاز آزمون سیستم پیشنهادی در نظر گرفته شدند.

آموزش شبکه سه‌گانه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرادیان کاهشی تصادفی (SGD^{۳۶}) با نرخ یادگیری^{۳۷} ۰/۰۰۱، کاهش وزن^{۳۸} ۰/۰۰۰۰۵ و تکانه^{۳۹} ۰/۹ انجام شده است. علاوه بر این تعداد دوره‌ها^{۴۰} برای آموزش شبکه ۱۵۰ و سائز دسته تصاویر ورودی شبکه ۳۲ در نظر گرفته شد.

آموزش طبقه‌بند نیز با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی گرادیان کاهشی تصادفی با نرخ یادگیری ۰/۰۰۱ و مقادیر پیش

³⁵ Accuracy

³⁶ Stochastic Gradient Descent

³⁷ Learning rate

³⁸ Weight decay

³⁹ Momentum

⁴⁰ Epoch

²⁸ Binary cross entropy

²⁹ False negative

³⁰ False positive

³¹ True positive

³² True negative

³³ Sensitivity

³⁴ Specificity

این سامانه با صحت بالایی قادر به تشخیص آلودگی فلز سنگین مس موجود در آب شرب می‌باشد.

سیاس‌گذاری

این مقاله حاصل طرح پژوهشی مورد حمایت شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی به شماره ثبت ۲۱۰۱۱۵-۱۳۷۶۷ در سامانه مدیریت اطلاعات تحقیقاتی کشور (سمات) است.

مراجع

- [۱] R. B. Jamie Bartram, "Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes," pp. 34,35, 1996.
- [۲] Y. Liao, J. Xu, and W. Wang, "A method of water quality assessment based on biomonitoring and multiclass support vector machine," *Procedia Environmental Sciences*, vol. 10, pp. 451-457, 2011.
- [۳] F. Yuan, Y. Huang, X. Chen, and E. Cheng, "A Biological Sensor System Using Computer Vision for Water Quality Monitoring," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 61535-61546, 2018.
- [۴] Y. Liao, J.-y. Xu, and Z.-w. Wang, "Application of biomonitoring and support vector machine in water quality assessment," *Journal of Zhejiang University Science B*, vol. 13, no. 4, pp. 327-334, 2012.
- [۵] Y. Liu, S.-H. Lee, and T.-S. Chon, "Analysis of behavioral changes of zebrafish (*Danio rerio*) in response to formaldehyde using Self-organizing map and a hidden Markov model," *Ecological Modelling*, vol. 222, no. 14, pp. 2191-2201, 2011.
- [۶] F. Han, J. Zhu, B. Liu, B. Zhang, and F. Xie, "Fish Shoals Behavior Detection Based on Convolutional Neural Network and Spatiotemporal Information," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 126907-126926, 2020.
- [۷] D. Israeli and E. Kimmel, "Monitoring the behavior of hypoxia-stressed *Carassius auratus* using computer vision," *Aquacultural engineering*, vol. 15, no. 6, pp. 423-440, 1996.
- [۸] C. Shuhong, Z. Shijun, and Z. Dianfan, "Water quality monitoring method based on feedback self correcting dense connected convolution network," *Neurocomputing*, vol. 349, pp. 301-313, 2019.
- [۹] S.-c. CHENG, K.-p. ZHAO, W. Ying, and S.-h. CHENG, "Water Quality Anomaly Monitoring Based on Kalman Filter and Convolution Neural Network," *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, no. icaic, 2019.

فرض برای سایر مولفه‌ها انجام گرفت. علاوه بر این تعداد دوره‌ها برای آموزش شبکه ۱۵۰ و سائز دسته تصاویر ورودی شبکه ۳۲ در نظر گرفته شد.

جدول (۱) ماتریس درهم ریختگی^{۴۱} روش پیشنهادی را بر روی مجموعه داده‌ی آزمون که شامل ۳۷۵ تصویر از شرایط نرمال و ۳۷۵ تصویر از شرایط آلوده آب است، را نشان می‌دهد.

جدول (۲) نیز نتایج حاصل از ارزیابی روش پیشنهادی را بر اساس سه معیار حساسیت، تشخیص و صحت نشان می‌دهد.

جدول ۱: ماتریس درهم ریختگی روش پیشنهادی

		برچسب تعیین شده توسط ماشین	
		سالم	آلوده
برچسب واقعی	سالم	۳۵۹	۱۶
	آلوده	۴	۳۷۱

جدول ۲: نتایج حاصل از ارزیابی روش پیشنهادی بر اساس سه معیار حساسیت، تشخیص و صحت

صحت	تشخیص	حساسیت
۹۷/۳	۹۵/۷	۹۸/۹

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش تشخیص آلودگی فلز سنگین مس در آب شرب به کمک زیست‌پایش مبتنی بر شبکه عصبی عمیق ارائه شد. در این روش داده‌های مورد استفاده جهت آموزش و آزمون شبکه عصبی عمیق، تصاویر حاصل از محاسبه جریان نوری فریم‌های متوالی ویدیو می‌باشد، که تغییرات سرعت و جهت حرکت دسته‌ای از ماهی‌ها را نشان می‌دهد. گام استخراج ویژگی از تصاویر به صورت خودکار و با استفاده از معماری سه‌گانه مبتنی بر شبکه عصبی عمیق و از پیش آموزش دیده Resnet101 انجام می‌گیرد و به منظور طبقه‌بندی نهایی ویژگی‌های استخراج شده از یک شبکه ساده تماماً متصل استفاده می‌شود. بر اساس نتایج بدست آمده،

⁴¹ Confusion matrix

- [٢١] C. Spampinato, S. Palazzo, D. Giordano, I. Kavasidis, F.-P. Lin, and Y.-T. Lin, "Covariance based Fish Tracking in Real-life Underwater Environment," in *VISAPP (2)*, 2012, pp. 409-414.
- [٢٢] B. F. Chew, H.-L. Eng, and M. Thida, "Vision-Based Real-Time Monitoring on the Behavior of Fish School," in *MVA*, 2009, pp. 90-93.
- [٢٣] I.-S. Kwak *et al.*, "Pattern recognition of the movement tracks of medaka (*Oryzias latipes*) in response to sub-lethal treatments of an insecticide by using artificial neural networks," *Environmental Pollution*, vol. 120, no. 3, pp. 671-681, 2002.
- [٢٤] V. M. Papadakis, I. E. Papadakis, F. Lamprianidou, A. Glaropoulos, and M. Kentouri, "A computer-vision system and methodology for the analysis of fish behavior," *Aquacultural engineering*, vol. 46 ,pp. 53-59, 2012.
- [٢٥] M. Thida, H.-L. Eng, and B. F. Chew, "Automatic Analysis of Fish Behaviors and Abnormality Detection," in *MVA*, 2009, pp. 278-282.
- [٢٦] A. S. Kane, J. D. Salierno, G. T. Gipson, T. C. Molteno, and C. Hunter, "A video-based movement analysis system to quantify behavioral stress responses of fish," *Water Research*, vol. 38, no. 18, pp. 3993-4001, 2004.
- [١٠] J .Xu, Y. Liu, S. Cui, and X. Miao, "Behavioral responses of tilapia (*Oreochromis niloticus*) to acute fluctuations in dissolved oxygen levels as monitored by computer vision," *Aquacultural engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 207-217, 2006.
- [١١] I. J. Kang, J .Moroishi, A. Nakamura, K. Nagafuchi, S. G. Kim, and Y. Oshima, "Biological monitoring for detection of toxic chemicals in water by the swimming behavior of small freshwater fish," *Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University*, vol. 54, no. 1, pp. 209-214, 2009.
- [١٢] C. Ji, S. Lee, I. Kwak, E. Cha, S. Lee, and T. Chon, "Computational analysis of movement behaviors of medaka (*Oryzias latipes*) after the treatments of copper by using fractal dimension and artificial neural networks," *Environmental toxicology*, pp. 93-107, 2006.
- [١٣] S. Fukuda, I. J. Kang, J. Moroishi, and A. Nakamura, "The application of entropy for detecting behavioral responses in Japanese medaka (*Oryzias latipes*) exposed to different toxicants," *Environmental toxicology*, vol. 25 ,no. 5, pp. 446-455, 2010.
- [١٤] X. Zhao, S. Yan, and Q. Gao, "An algorithm for tracking multiple fish based on biological water quality monitoring," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 15018-15026, 2019.
- [١٥] S. Cheng, K. Zhao, and D. Zhang, "Abnormal Water Quality Monitoring Based on Visual Sensing of Three-Dimensional Motion Behavior of Fish," *Symmetry*, vol. 11, no. 9, p. 1179, 2019.
- [١٦] H. L. Eng *et al.*, "A Fish Activity Monitoring System for Early Detection of Water Contamination," 2008.
- [١٧] C. Serra-Toro, R .Montoliu, V. J. Traver, I. M. Hurtado-Melgar, M. Núñez-Redó, and P. Cascales, "Assessing water quality by video monitoring fish swimming behavior," in *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*, 2010, pp. 428-431: IEEE.
- [١٨] T. Pinkiewicz ,G. Purser, and R. Williams, "A computer vision system to analyse the swimming behaviour of farmed fish in commercial aquaculture facilities: A case study using cage-held Atlantic salmon," *Aquacultural Engineering*, vol. 45, no. 1, pp. 20-27, 2011.
- [١٩] Y .Hou, "Implementation of Water Quality Management by Fish School Detection Based on Computer Vision Technology," *Advance Journal of Food Science and Technology*, vol. 9, no. 6, pp. 422-427, 2015.
- [٢٠] L. O. Teles, M. Fernandes, J. Amorim, and V. Vasconcelos" ,Video-tracking of zebrafish (*Danio rerio*) as a biological early warning system using two distinct artificial neural networks: Probabilistic neural network (PNN) and self-organizing map (SOM)," *Aquatic Toxicology*, vol. 165, pp. 241-248, 2015.