

طراحی یک شبکه عصبی کانولوشنال مبتنی بر بانک فیلتر برای طبقه‌بندی تصاویر اعداد دست‌نویس

دروگر محمد، علی^۱، کرمی ملایی، محمد رضا^{۲*}، حسن زاده، محمد رضا^۳

^۱ دانشجوی دکتری مهندسی پزشکی، گروه مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر،

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

^۲ دانشیار، گروه مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر،

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

^۳ استادیار، گروه مهندسی برق-الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر،

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

چکیده

در سال‌های اخیر شبکه‌های عصبی کانولوشنال به‌طور فزاینده‌ای در کاربردهای مختلف بینایی ماشین و به‌ویژه در شناسایی و طبقه‌بندی خودکار تصاویر استفاده شده‌اند. این نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی با شبیه‌سازی عملکرد قشر بینایی مغز قدرتمندترین ساختار را در تجزیه و تحلیل داده‌های بصری دارند. اما تنوع تصاویر دیجیتال و گوناگونی محتوا و ویژگی‌های آن‌ها ایجاب می‌کند برای دستیابی به کارایی بالاتر در هر مسئله طبقه‌بندی، شبکه‌های کانولوشنال به‌صورت اختصاصی طراحی و شاخص‌های آن‌ها به‌دقت تنظیم شوند. در این راستا، در پژوهش حاضر ضرایبی بهینه برای صافی‌های لایه کانولوشن در شروع آموزش شبکه به‌کاررفته تا از این طریق دقت طبقه‌بندی در شبکه افزایش، و زمان آموزش کاهش یابد. این کار با طراحی و به‌کارگیری مجموعه‌ای از صافی‌های تخصصی برای لایه کانولوشن در قالب یک بانک فیلتر و جای‌گذاری آن‌ها به‌جای صافی‌های تصادفی انجام شده و بر روی پایگاه داده تصاویر اعداد دست‌نویس MNIST ارزیابی شده‌است. آزمایش‌های ما بر روی شبکه کانولوشنال تک‌لایه با سه نوع صافی‌گذاری (صافی‌های عدد ثابت، عدد تصادفی و بانک فیلتر) میانگین دقت طبقه‌بندی تصاویر اعداد دست‌نویس MNIST را در پنجاه بار آموزش شبکه به‌ترتیب ۷۴/۹۴، ۸۶/۴۷ و ۹۱/۸۹ درصد و برای شبکه کانولوشنال سه‌لایه به‌ترتیب ۸۸/۸۲، ۹۶/۱۶ و ۹۹/۱۴ درصد نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهند که صافی‌های به‌کاررفته در الگوی پیشنهادی در مقایسه با صافی‌های تصادفی ویژگی‌های مؤثرتری را از تصاویر استخراج کرده، و با شروع آموزش شبکه از نقطه مناسب‌تر، بدون افزایش هزینه محاسباتی دقت طبقه‌بندی را افزایش داده‌اند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که ضرایب اولیه صافی‌های لایه کانولوشن بر دقت طبقه‌بندی شبکه‌های کانولوشنال مؤثر است و با به‌کارگیری صافی‌های مؤثرتر در لایه کانولوشن می‌توان این شبکه‌ها را خاص مسئله کرده و از این طریق کارایی شبکه را افزایش داد.

واژگان کلیدی: شبکه‌های عصبی کانولوشنال، طبقه‌بندی تصاویر، اعداد دست‌نویس، پایگاه داده MNIST

Design of a Filter Bank-based Convolutional, Neural Network to Classify Handwritten Digit Images

Derogar Moghadam, Ali¹, Karami Mollaei, Mohammad Reza^{2*},
Hassanzadeh, Mohammadreza³

¹ Ph.D. Student, Bioelectric Department, Electrical & Computer Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

² Associate Professor, Bioelectric Department, Electrical & Computer Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

³ Assistant Professor, Electrical Engineering Department, Electrical & Computer Faculty, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

* Corresponding author

* نویسنده‌دار مکاتبات

سال ۱۴۰۲ شماره ۳ پیاپی ۵۷

• تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۴/۷ • تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۹/۵ • تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴ • نوع مطالعه: پژوهشی

Background: In recent years, convolutional, neural networks (CNNs) have been increasingly used in various applications of machine vision. CNNs simulate the function of the brain's visual cortex and they have a powerful structure to analyze visual images. However, the diversity of digital images and the diversity of their content and features require that, CNN networks are specially designed and their parameters are carefully adjusted to achieve higher efficiency in any classification problem. In this regard, in many previous studies, researchers have attempted to increase the efficiency of the CNNs by setting their adjustable parameters, more accurately.

New method: In this study, we presented a novel initializing method for the kernels of the first convolutional layer of the CNN networks. We designed a filter bank with specialized kernels and used them in the first convolution layer of the proposed models. These kernels compared to the random kernels (in traditional CNNs), without increasing the computational cost of the network extract more effective features from the input images and improve classification accuracy by covering all the important characteristics.

Results: The dataset used in this paper was the MNIST database of handwritten digits. We examined the performance of CNN networks when three different types of kernels were used in their first convolution layer. The first group of kernels had constant coefficients; the second group had random coefficients and finally the kernels of the third group were specially designed to extract a wide range of image features. Our experiments on a single-layer CNN network with three types of kernels (constant numbers, random numbers, and filter-bank), showed the average classification accuracy of MNIST images in 50 times of network training to be 74.94, 86.47, and 91.89 percent, respectively, and for a three-layer CNN network, 88.82, 96.16, and 99.14 percent, respectively.

Comparison with existing methods: Compared to the kernels with randomized coefficients, the use of specialized kernels in the first convolution layer of the CNN networks has several important advantages: 1) They can be designed to extract all important features of the input images, 2) They can be designed more effectively based on the problem in hand, 3) They cause the training start from a more appropriate point, and in this way, the speed of training and the classification accuracy of network increase.

Conclusion: This study provides a novel method to initialize kernels in convolution layers of CNN networks to enhance their performance in image classification works. Our results show that compared to random kernels, the kernels used in the proposed models extract more effective features from the images at different frequencies and increase the classification accuracy by starting the training algorithm from a more appropriate point, without increasing the computational cost. Therefore, it can be concluded that the initial coefficients of the convolution layer kernels are effective on the classification accuracy of CNN networks, and by using more effective kernels in the convolution layers, these networks can be made specific to the problem and in this way, increase the efficiency of the network.

Keywords: convolutional neural network, image classification, handwritten digit, MNIST database

که در تصاویر یک طبقه مشابه و در طبقات متفاوت به خوبی قابل تشخیص و تمایز باشند، و سپس این ویژگی-ها را به وسیله یک طبقه‌بند مناسب در رده‌های موجود تقسیم‌بندی کند. از این رو، تاکنون روش‌های مختلفی برای استخراج ویژگی‌های مؤثر از تصاویر و طبقه‌بندی متفاوتی نیز برای انجام یک رده‌بندی با کیفیت ارائه و بر روی داده‌های تصویری با محتوای متفاوت آزموده شده‌اند [۳]، [۴].

بسیاری از پژوهش‌گران در مسئله طبقه‌بندی تصاویر بر شناسایی خودکار نویسه‌ها و اعداد دست‌نویس متمرکز بوده‌اند. چراکه شناسایی و طبقه‌بندی خودکار و دقیق ارقام دست‌نویس به روش‌های بینایی ماشین کاربردهای زیادی در دستگاه‌های خودخوان نشانی‌های پستی، چک‌ها و اسکناس‌ها، بارکدها، فرم‌های مالیاتی و بسیاری از مسائل آینده که ارتباط بین انسان و رایانه را تسهیل می‌کنند، دارد [۵]. اما، شناسایی و طبقه‌بندی خودکار ارقام دست‌نویس با چالش‌هایی مانند یکسان نبودن

۱- مقدمه

شناسایی و طبقه‌بندی خودکار تصاویر، یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مسائل در حوزه بینایی ماشین است و در یک دهه اخیر کاربردهای روزافزونی در پردازش تصاویر پزشکی، تصاویر ماهواره‌ای و سنجش از راه دور، صنایع غذایی، شناسایی چهره و حالات آن، شناسایی حروف و اعداد، و بسیاری از حوزه‌های مرتبط با تصاویر دیجیتال یافته‌است [۱]. اگرچه برای انسان شناسایی و طبقه‌بندی تصاویر با محتوای متفاوت بر اساس ویژگی‌های نهفته در آن‌ها کاری آسان است، اما رایانه‌ها نیازمند الگوریتم‌هایی بسیار پیچیده و زمان‌بر هستند تا بتوانند تصاویر مختلف را با دقت بالا از یکدیگر تشخیص دهند [۲]. در کلی‌ترین حالت می‌توان یک سامانه خودکار برای طبقه‌بندی تصاویر را متشکل از دو بخش اصلی در نظر گرفت؛ بخش استخراج ویژگی و بخش طبقه‌بندی. بر این اساس، یک سامانه قابل اعتماد و دقیق برای طبقه‌بندی تصاویر، نخست باید بتواند ویژگی‌هایی را از تصاویر ورودی استخراج کند

فصل ۱



اندازه، ضخامت، جهت و موقعیت اعداد در تصویر و نیز تفاوت‌های فاحش در دست‌خط افراد روبه‌روست. بنابراین، الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصویر در این حوزه باید از کارایی بالایی برخوردار باشند تا به دقت و قابلیت اعتماد بالا دست یابند. الگوریتم‌های معرفی‌شده برای طبقه‌بندی ارقام دست‌نویس در یک تقسیم‌بندی کلی در چهار گروه الگوریتم‌های مبتنی بر تطبیق الگو^۱، روش‌های آماری^۲، روش‌های ساختاری^۳ و شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴ قرار می‌گیرند [۶]. در روش‌های مبتنی بر تطبیق الگو، میزان شباهت بین دو بردار ویژگی (متشکل از گروه‌های پیکسلی، شکل‌ها، انحناها و غیره) در فضای ویژگی سنجش می‌شود. روش‌های آماری در اساس، بر مبنای برخی توابع تصمیم‌گیری آماری و مجموعه‌ای از معیارهای بهینه عمل و احتمال تعلق الگوی مشاهده‌شده به یک رده خاص را تعیین می‌کنند. روش‌هایی مانند K نزدیک‌ترین همسایه^۵، ماشین بردار پشتیبان^۶، الگوی مخفی مارکوف^۷، طبقه‌بند بیزین و استدلال فازی از این دسته هستند. در روش‌های ساختاری، ارقام به صورت واحدهای ساختاری در نظر گرفته می‌شوند، کمی می‌شوند و رابطه بین آن‌ها جستجو می‌شود. در نهایت، روش‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی که به طور وسیعی در مسائل طبقه‌بندی تصویر، و نیز در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده‌است، ویژگی‌هایی مانند دقت و کیفیت بالا، آموزش‌پذیری خودکار بر اساس داده‌ها، عملکرد مناسب در طبقه‌بندی داده‌های نوفه‌ای، قابلیت پیاده‌سازی به صورت موازی و کارآمدی در یادگیری پایگاه داده‌های عظیم را دارند [۶].

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک الگوی محاسباتی رایانه‌ای هستند که عملکرد آن‌ها از شبکه‌های عصبی زیستی در مغز انسان الهام گرفته شده‌است. در این شبکه‌ها پردازش اطلاعات از طریق تعداد زیادی واحدهای کوچک به نام نورون (گره) که در لایه‌های متوالی قرار گرفته و به هم پیوسته‌اند، انجام می‌شود. شبکه‌های عصبی مصنوعی عملکرد خیره‌کننده‌ای در بسیاری از مسائل شناسایی الگو و طبقه‌بندی دارند [۷]. اما طبقه‌بندی تصاویر به وسیله این شبکه‌ها همواره با چالش‌هایی روبه‌رو بوده‌است. یکی از مهم‌ترین این چالش‌ها عدم امکان تزریق مستقیم تصاویر به این شبکه‌ها (به‌ویژه تصاویر با ابعاد بالا) به دلیل تشدید

افسارگسیخته حجم و زمان محاسبات و نیز عملکرد پایین شبکه در طبقه‌بندی تصاویر به این روش است. به عبارت دیگر، طبقه‌بندی تصاویر به وسیله شبکه‌های عصبی مصنوعی در حالت کلی نیازمند مراحل پیش-پردازشی استخراج و انتخاب ویژگی (کاهش ابعاد بردار ویژگی) به صورت دستی و قبل از اعمال تصویر به شبکه است. این امر به طور معمول، مطابق با مسئله پیش‌رو انجام شده و کاری بسیار پیچیده و وقت‌گیر است [۸]، [۹]؛ از این رو در سال‌های اخیر به شبکه‌های عصبی کانولوشنال^۸ برای طبقه‌بندی تصاویر به شدت توجه شده‌است. این نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی، ساختار ویژه‌ای برای کار با تصاویر داشته و به جرأت می‌توان گفت که قدرتمندترین و مؤثرترین پیکربندی را برای پردازش تصاویر دارند [۱۰]. مهم‌ترین برتری شبکه‌های کانولوشنال در هنگام کار با تصاویر، انجام عملیات استخراج ویژگی، انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی در یک ساختار واحد و منسجم است. به عبارت دیگر، این شبکه‌ها برخلاف سایر شبکه‌های عصبی مصنوعی نیازمند مراحل جداگانه‌ای برای استخراج ویژگی و کاهش ابعاد بردار ویژگی نیستند و به طور مستقیم، تصویر خام را در ورودی خود دریافت و آن را طبقه‌بندی می‌کنند [۱۱]. شبکه‌های کانولوشنال از پژوهش‌های دو پژوهشگر دانشگاه هاروارد (Hubel & Wiesel) که در دهه ۱۹۶۰ میلادی بر روی قشر بینایی مغز گرهبه آزمایش می‌کردند، منشأ گرفته‌اند [۱۲]. پژوهش‌های این پژوهشگران نشان می‌داد که در لایه‌های اولیه قشر بینایی مغز، نورون‌ها به ویژگی‌های سطح پایین تصویر (مانند لبه‌ها و شدت روشنایی‌ها) و در لایه‌های بعد به ویژگی‌های پیچیده‌تر تصویر حساسیت نشان می‌دهند. بر این اساس در سال ۱۹۸۷، فوکوشیما یک الگوی نظری برای شبکه‌های کانولوشنال مطرح کرد و پس از آن، این شبکه‌ها به تدریج پیاده‌سازی و در عمل استفاده شدند [۱۳]. شبکه‌های کانولوشنال از این واقعیت که ورودی شبکه از جنس تصویر است، استفاده کرده و معماری شبکه را به طور معقولی محدود می‌کنند. این شبکه‌ها از سه نوع لایه اصلی تشکیل می‌شوند: لایه‌های کانولوشن^۹، لایه‌های نمونه‌بردار کاهنده^{۱۰} و لایه‌های به طور کامل پیوسته^{۱۱}. به طوری که لایه‌های کانولوشن عملیات استخراج ویژگی، لایه‌های نمونه‌بردار کاهنده عملیات انتخاب ویژگی و لایه‌های

⁸ Convolutional Neural Network (CNN)

⁹ Convolution Layer

¹⁰ Pooling Layer

¹¹ Fully Connected Layers

¹ Template Matching

² Statistical Techniques

³ Structural Techniques

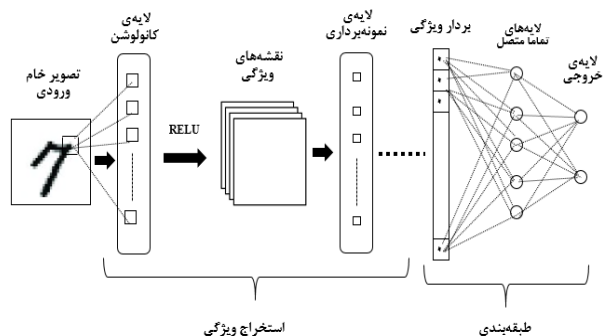
⁴ Artificial Neural Networks (ANN)

⁵ k-Nearest-Neighbor (K-NN)

⁶ Support Vector Machine (SVM)

⁷ Hidden Markov Model (HMM)

به طور کامل پیوسته عملیات طبقه‌بندی را در معماری مرسوم یک شبکه کانولوشنال انجام می‌دهند. شکل (۱) لایه‌های اصلی یک شبکه کانولوشنال را که برای طبقه‌بندی اعداد دست‌نویس طراحی شده‌است، نشان می‌دهد.



(شکل-۱): لایه‌های اصلی یک شبکه عصبی کانولوشنال در

مسئله طبقه‌بندی اعداد دست‌نویس

(Figure-1): The main layers of a CNN network in handwritten digits classification

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، ورودی شبکه کانولوشنال یک تصویر خام (نه یک بردار از ویژگی‌های تصویر) است. همچنین، اگرچه یک شبکه کانولوشنال می‌تواند بسته به کاربردی که دارد، تعداد و ترکیب متفاوتی از لایه‌های یادشده را داشته‌باشد، اما عملکرد این لایه‌ها در کل در دو بخش استخراج ویژگی و طبقه‌بندی تقسیم‌بندی می‌شود. تفاوت اصلی شبکه‌های کانولوشنال با سایر شبکه‌های عصبی نیز در بخش نخست این شبکه‌ها (بخش استخراج ویژگی) است. در این بخش، ویژگی‌های تصویر خام واردشده به شبکه، به وسیله صافی‌هایی (کرنل‌هایی) که با آن کانالو می‌شوند، استخراج شده، سپس تعداد این ویژگی‌ها در گذر از لایه‌های بعدی شبکه کاهش می‌یابد. بنابراین، خروجی بخش استخراج ویژگی، یک بردار ویژگی است که در بخش دوم شبکه به وسیله یک ساختار به‌طور کامل پیوسته طبقه‌بندی می‌شود. بر این اساس، در یک شبکه کانولوشنال ابعاد تصویر ورودی در عبور از لایه‌های شبکه کاهش یافته و همگام با رسیدن به انتهای شبکه، تصویر ورودی به یک بردار حاوی امتیاز دسته‌ها (کلاس‌ها) تبدیل و در نهایت طبقه‌بندی می‌شود. ویژگی‌های مهم شبکه‌های کانولوشنال عبارتند از: عملکرد ویژه بر روی ورودی‌های دو یا چندبعدی و از جنس تصویر، انجام عملیات استخراج ویژگی، انتخاب ویژگی و طبقه‌بندی در یک ساختار مجتمع و پردازش محلی ورودی با اتصال هر نورون به بخش کوچکی از حجم ورودی [۱۴].

امروزه شبکه‌های کانولوشنال افق‌های تازه‌ای را در کاربردهای مختلف بینایی ماشین روشن کرده، و مطالعات

انجام‌شده بر روی آن‌ها عملکرد مناسب این شبکه‌ها را در بسیاری از زمینه‌ها به اثبات رسانده‌اند. در یک دهه اخیر شبکه‌های کانولوشنال در مسائل شناسایی تصاویر [۱۵]، [۱۶]، تشخیص اشیا در تصاویر [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]، بخش‌بندی تصاویر [۲۰]، [۲۱] و طبقه‌بندی تصاویر [۲۲] عملکرد خیره‌کننده‌ای از خود نشان داده‌اند. این شبکه‌ها در شناسایی و طبقه‌بندی نویسه‌ها و اعداد دست‌نویس نیز استفاده شده‌اند. در این زمینه، نخستین بار در سال ۱۹۹۸، LeCun و همکارانش پایگاه داده MNIST^۱ را طراحی و از یک شبکه کانولوشنال برای طبقه‌بندی تصاویر مربوط به نویسه‌ها استفاده کردند [۲۳]. آن‌ها توانستند به کمک شبکه پیشنهادی به بالاترین دقت تشخیص در آن زمان برسند. Simard و همکارانش یک شبکه کانولوشنال با معماری ساده را برای طبقه‌بندی تصاویر اعداد دست‌نویس لاتین در پایگاه داده MNIST معرفی کردند [۲۴]. آن‌ها عملکرد شبکه‌های کانولوشنال را با شبکه‌های پرسپترون چندلایه^۲ با ساختار به‌طور کامل پیوسته در دو لایه مقایسه کردند. در این پژوهش خطای طبقه‌بندی برای شبکه کانولوشنال، چهاردهم درصد و برای شبکه پرسپترون چندلایه، هفت‌دهم درصد گزارش شد. پس از اثبات کارایی شبکه‌های کانولوشنال در طبقه‌بندی تصاویر اعداد دست‌نویس در بسیاری از پژوهش‌های بعدی تلاش شد عملکرد این شبکه‌ها بهبود یابد. در این راستا، در برخی پژوهش‌ها این شبکه‌ها با الگوریتم‌های تکاملی، یا سایر روش‌های بهینه‌سازی ترکیب شدند تا انتخاب فراشاخص‌های شبکه بهینه شده و دقت طبقه‌بندی افزایش یابد. در مواردی نیز تلاش بر این بود که الگوهای قوی‌تری از شبکه‌های کانولوشنال طراحی شود تا خطای طبقه‌بندی کاهش یابد.

به‌عنوان مثال، Tabik و همکارانش تأثیر برخی روش‌های پیش‌پردازش تصاویر را بر دقت طبقه‌بندی چند الگوی پیش‌ساخته از شبکه‌های کانولوشنال (LeNet^۳ [۲۳]، Network3 [۲۵] و DropConnect [۲۶]) بررسی کردند. در این مقاله از تصاویر پایگاه داده اعداد دست‌نویس لاتین MNIST استفاده شد. آن‌ها، نخست دقت الگوهای مذکور را بر روی تصاویر پایگاه داده سنجیدند، سپس این تصاویر را تحت تبدیل‌های الاستیک، انتقال، چرخش و ترکیب-های متفاوتی از آن‌ها قرار داده و مجدد عملکرد هر الگو را در طبقه‌بندی تصاویر به‌دست‌آمده بررسی کردند. نتایج

¹ National Institute of Standards and Technology database (MNIST)

² Multi-Layer Perceptron (MLP)

این پژوهش نشان می‌داد که عملیات پیش‌پردازشی مانند انتقال مرکز ثقل اعداد به مرکز تصویر، خنثی‌سازی چرخش و تغییرات الاستیک در تصاویر می‌تواند دقت طبقه‌بندی را در شبکه‌های کانولوشنال تا هفتاد و یک درصد در صد افزایش دهد [۲۷].

Ahlawat و همکارانش با هدف بهبود دقت طبقه‌بندی تصاویر اعداد دست‌نویس پایگاه داده MNIST تلاش کردند تا بهترین پیکربندی و تنظیمات را برای فراشاخصهای شبکه کانولوشنال تعیین کنند. آزمایش‌های آن‌ها بر روی دو پیکربندی مختلف شبکه کانولوشنال با سه و چهار لایه کانولوشن و نیز تنظیمات متفاوت فراشاخصها نشان داد که بهترین دقت طبقه‌بندی شبکه پیشنهادی آن‌ها ۹۹/۸۷ درصد است [۲۸]. وی و همکارانش در پژوهشی دیگر با ترکیب ویژگی‌های کلیدی شبکه‌های کانولوشنال و طبقه‌بند دودویی ماشین‌بردار پشتیبان الگویی قدرتمند برای طبقه‌بندی خودکار تصاویر پایگاه داده اعداد دست‌نویس لاتین MNIST ارائه دادند. در الگوی پیشنهادی آن‌ها لایه‌های کانولوشن و نمونه‌بردار کاهنده در شبکه کانولوشنال وظیفه استخراج ویژگی‌های تصویر و طبقه‌بند دودویی ماشین‌بردار پشتیبان وظیفه رده‌بندی بردار ویژگی را در خروجی شبکه بر عهده داشت. الگوی پیشنهادی آن‌ها توانست تنها با یک لایه کانولوشن به دقت ۹۹/۲۸ درصد برسد [۲۹].

Saqib و همکارانش با ترکیب الگوریتم ماشین با امکان یادگیری شدید^۱ و شبکه‌های کانولوشنال تلاش کردند دقت طبقه‌بندی تصاویر اعداد دست‌نویس در پایگاه داده MNIST را افزایش دهند. آن‌ها لایه‌های به‌طور کامل پیوسته شبکه کانولوشنال را با ساختار ماشین با امکان یادگیری شدید جایگزین کردند. بنابراین، در ساختار پیشنهادی آن‌ها لایه‌های کانولوشن وظیفه استخراج ویژگی‌های تصویر و ساختار ماشین با امکان یادگیری شدید وظیفه طبقه‌بندی بردارهای ویژگی را بر عهده داشت. شبکه پیشنهادی آن‌ها از سه لایه کانولوشن و سه لایه طبقه‌بندی تشکیل می‌شد. دقت گزارش شده برای این شبکه ۹۹/۸ درصد بود [۳۰].

Calderon و همکارانش، برای بهبود عملکرد شبکه‌های کانولوشنال از صافی‌های گابور در نخستین لایه کانولوشن شبکه استفاده کردند تا ویژگی‌های تصویر را در فرکانس‌های مختلف استخراج کنند. شبکه پیشنهادی آن‌ها دارای دو لایه کانولوشن بود و از الگوریتم پس‌انتشار^۲ خطا برای

تصحیح شاخص‌های شبکه استفاده می‌کرد. آن‌ها خطای طبقه‌بندی شبکه کانولوشنال پیشنهادی را بر روی پایگاه داده تصاویر اعداد دست‌نویس لاتین MNIST، شصت و هشت درصد گزارش کردند [۳۱].

Le و همکارانش، برای بهبود عملکرد شبکه‌های کانولوشنال در طبقه‌بندی تصاویر، الگوریتم آموزش شبکه را تغییر دادند. در این پژوهش از یک الگوریتم مبتنی بر حافظه محدود به جای الگوریتم نزولی گرادیان تصادفی^۳ در آموزش شبکه استفاده شد. نتایج این پژوهش در طبقه‌بندی تصاویر اعداد دست‌نویس پایگاه داده MNIST نشان می‌داد که تغییر الگوریتم آموزش در شبکه‌های کانولوشنال می‌تواند بر سرعت آموزش شبکه و دقت طبقه‌بندی مؤثر باشد [۳۲].

باتوجه به مقدمه ارائه شده می‌توان دریافت که شبکه‌های کانولوشنال زمینه‌ای جذاب و در حال رشد در کاربردهای مختلف بینایی ماشین هستند. این شبکه‌ها اگرچه به‌طور معمول، از ساختار استاندارد استفاده می‌کنند، شامل فراشاخص‌هایی هستند که با تنظیم دقیق آن‌ها می‌توان عملکرد شبکه را بهبود بخشید. در این مقاله، ما روشی جدید برای بهبود کارایی شبکه‌های کانولوشنال ارائه داده‌ایم که امکان دستیابی به نتایج بهتر را در مدت زمان کمتر فراهم می‌آورد. روش پیشنهادی همچنین قادر است تا تنظیمات شبکه را بر اساس مسئله پیش‌رو تغییر داده و از این طریق عملکرد بهتر شبکه را در طبقه‌بندی تصاویر در پی داشته باشد.

۲- مواد و روش‌ها

در این بخش، نخست، مشخصات مجموعه داده‌ای که برای ارزیابی الگوی پیشنهادی استفاده شد، ارائه می‌شود و پس از آن عملکرد لایه‌های مختلف شبکه کانولوشنال تشریح و الگوی پیشنهادی ارائه می‌شود.

۲-۱- پایگاه داده

در این پژوهش برای ارزیابی کارایی الگوی پیشنهادی و بررسی و مقایسه دقت و قابلیت اطمینان آن نسبت به حالت مرسوم شبکه‌های کانولوشنال از تصاویر موجود در پایگاه داده MNIST استفاده شد [۳۳]. این پایگاه داده در مجموع شامل هفتاد هزار تصویر سیاه و سفید از اعداد دست‌نویس لاتین (۰ تا ۹) است که از ۲۵۰ فرد مختلف گرفته شده است. این تصاویر همگی ابعاد ۲۸×۲۸ پیکسل

^۳ Stochastic Gradient Descent (SGD)

^۱ Pooling Extreme Learning Machine (ELM)

^۲ Back Propagation

۲-۲-۲ - لایه کانولوشن

لایه‌های کانولوشن هسته اصلی تشکیل‌دهنده یک شبکه کانولوشن هستند و بخش مهمی از بار محاسباتی شبکه در این لایه‌ها انجام می‌شود. وظیفه این لایه‌ها استخراج ویژگی‌های مؤثر از تصاویر ورودی است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، هر لایه کانولوشن از تعدادی صافی (یا کرنل) آموزش‌پذیر تشکیل شده‌است که عرض و ارتفاع مشخصی (بسیار کوچکتر از تصویر ورودی) دارند. این صافی‌ها یک‌به‌یک با تصویر ورودی کانوالو^۱ می‌شوند و هریک از آن‌ها آرایه‌ای را از ویژگی‌های استخراج‌شده از تصویر می‌سازند که به آن نقشه ویژگی^۲ می‌گویند. به عبارت دیگر، هر صافی، در راستای عرض و ارتفاع تصویر ورودی با گام^۳ مشخصی حرکت می‌کند و در هر بار توقف ضرب نقطه‌ای بین درایه‌های صافی و درایه‌های تصویر ورودی محاسبه می‌شود، که از کنار هم قرارگرفتن آن‌ها یک نقشه ویژگی ساخته می‌شود. بنابراین، هر نقشه ویژگی نشان‌دهنده پاسخ منحصربه‌فرد یک صافی در موقعیت‌های مکانی مختلف است.

لایه‌های کانولوشن فراشاخصیایی مانند تعداد، ابعاد و ضرایب صافی‌ها و دو شاخص گام و پدینگ^۴ دارند که تنظیم دقیق آن‌ها بر بهبود عملکرد شبکه مؤثر است. به‌طوری‌که تعداد صافی‌ها در هر لایه کانولوشن تعداد نقشه‌های ویژگی در خروجی لایه را مشخص می‌کند. تنظیم دقیق ابعاد صافی‌ها بر اساس ابعاد ویژگی‌های موردنظر در تصویر می‌تواند بر استخراج بهینه‌تر ویژگی‌ها مؤثر باشد. ضرایب صافی‌ها که به‌طورمستقیم بر نوع ویژگی‌های استخراج‌شده از تصویر تأثیر می‌گذارند و در نهایت، گام میزان جابه‌جایی هر صافی بین دو کانوالو متوالی و پدینگ تعداد سطر و ستونی را که قبل از انجام کانولوشن به اطراف تصویر ورودی اضافه می‌شود، تعیین می‌کنند. بر این اساس، ابعاد هر نقشه ویژگی در خروجی لایه کانولوشن از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$O = \left\lceil \frac{X - W + 2P}{S} \right\rceil + 1 \quad (2)$$

به‌طوری‌که O ابعاد نقشه ویژگی در خروجی لایه کانولوشن، X ابعاد ورودی، P ابعاد پدینگ، S ابعاد گام و W ابعاد صافی‌های لایه کانولوشن هستند. شکل (۳) عملکرد یک لایه کانولوشن را در شبکه کانولوشن نشان می‌دهد.

¹ Convolve

² Feature Map

³ Stride

⁴ Padding

داشته و از ۲۵۶ سطح خاکستری تشکیل شده‌اند. تصاویر از نظر اندازه عادی‌سازی شده و در مرکز قرار گرفته‌اند. همچنین، برای مقایسه بهتر نتایج در پژوهش‌های مختلف شصت‌هزار تصویر برای آموزش و ده‌هزار تصویر برای تست الگوریتم‌های طبقه‌بندی تصویر توسط طراحان این پایگاه داده به‌طور جداگانه دسته‌بندی شده‌است. شکل (۲) مثالی از تصاویر پایگاه داده MNIST را نشان می‌دهد.



(شکل-۲): نمونه‌هایی از تصاویر پایگاه داده‌ی MNIST

(Figure-2): Examples of MNIST database images

۲-۲ شبکه‌های کانولوشن و الگوی

پیشنهادی

۲-۲-۱ - لایه ورودی

لایه ورودی در شبکه‌های کانولوشن بر اساس نوع ورودی مشخص می‌شود. این لایه می‌تواند به‌صورت یک‌بعدی (مانند سیگنال‌ها)، دوبعدی (مانند تصاویر خاکستری)، سه‌بعدی (مانند تصاویر رنگی) و یا حتی با ابعاد بالاتر باشد. اما ساختار و عملکرد شبکه‌های کانولوشن در اساس، بر روی ورودی‌هایی از جنس تصویر بهینه است. در الگوی پیشنهادی لایه ورودی آرایه‌هایی (تصاویری) با ابعاد ۲۸×۲۸ بودند که از پایگاه داده MNIST دریافت و قبل از تزریق به شبکه مقادیر شدت روشنایی آن‌ها به‌وسیله معادله (۱) در بازه ۰-۱ طبیعی (نرمالیزه) شده‌بود.

$$X' = \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \quad (1)$$

در معادله (۱)، X یک آرایه ۲۸×۲۸ از شدت روشنایی پیکسل‌های تصویر و $\min(X)$ و $\max(X)$ به‌ترتیب کمترین و بیشترین شدت روشنایی تصویر در این آرایه است.

تولید می‌کنند که در هر بار آموزش شبکه تغییر می‌کنند. شکل (۴) دو نمونه از صافی‌های تصادفی با ابعاد 5×5 را که به‌طور معمول در شروع آموزش شبکه‌های کانولوشنال استفاده می‌شوند، نشان می‌دهد.

-0.079	0.441	-0.982	0.541	-0.283	0.260	0.863	-0.234	0.126	-0.751
0.898	0.101	-0.093	0.389	-0.329	-0.613	-0.712	0.522	-0.431	0.052
0.183	0.787	-0.435	0.751	0.902	0.326	0.089	0.712	-0.821	-0.744
0.291	-0.167	-0.168	0.778	-0.836	-0.323	0.232	-0.188	-0.632	0.326
0.113	-0.854	-0.218	0.223	0.067	-0.442	0.456	-0.953	0.663	-0.016

(شکل-۴): نمونه‌ای از صافی‌های تصادفی با ابعاد 5×5

(Figure-4): Examples of random filters

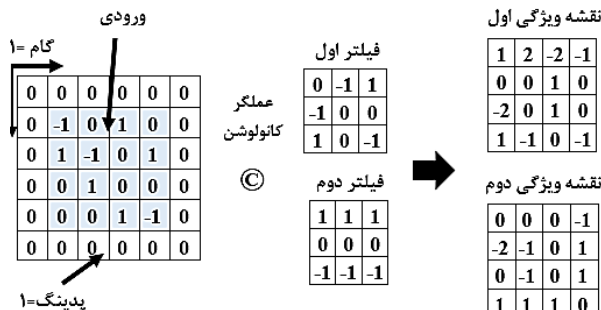
همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود، ضرایب صافی‌ها در این حالت به‌طور کامل تصادفی و بدون در نظر گرفتن هیچ پیش‌شرط خاصی تولید می‌شوند. این ضرایب تصادفی اگرچه در فرآیند آموزش شبکه به سمت ضرایب بهینه تغییر می‌کنند، در شروع آموزش هیچ ویژگی یا الگوی خاصی را از تصویر ورودی استخراج نمی‌کنند. بنابراین، می‌توان گفت که انتخاب ضرایب تصادفی برای صافی‌های لایه کانولوشن به دلایل زیر نامناسب است:

(۱) ایجاد صافی‌هایی با ضرایب مشابه: در صورتی که دو یا چند صافی ضرایبی همگن از نظر مکانی داشته باشند، ویژگی‌هایی مشابه را از تصویر استخراج می‌کنند، که این امر عملکرد شبکه را کاهش می‌دهد.

(۲) عدم پوشش تمامی ویژگی‌های مؤثر: احتمال بسیار بالایی وجود دارد که صافی‌های تصادفی نتوانند تمامی ویژگی‌های مهم در تصویر را مانند لبه‌ها، شکل‌ها، خط‌ها، زاویه‌ها و ...، در تمامی جهت‌های ممکن استخراج کنند.

(۳) ماهیت تصادفی: مقداردهی تصادفی به ضرایب صافی‌ها در لایه‌های کانولوشن سبب می‌شود تا الگوریتم در هر بار آموزش از نقطه‌ای متفاوت شروع به آموزش کرده و در نتیجه هم‌گرایی مناسبی در پاسخ‌ها وجود نداشته باشد. این امر در بسیاری از موارد سبب ایجاد پاسخ‌های پرت و دور از واقعیت می‌شود. ماهیت تصادفی ضرایب همچنین، امکان طراحی صافی‌ها بر اساس مسئله پیش‌رو را از بین می‌برد.

(۴) افزایش هزینه زمانی و محاسباتی شبکه: ضرایب ناکارآمد صافی‌ها و شروع آموزش از نقطه‌ای نامناسب به‌طور مستقیم بر هزینه زمانی و محاسباتی شبکه تأثیر می‌گذارد و آن‌ها را به‌طور نامعقولی افزایش می‌دهد.



(شکل-۳): عملکرد لایه کانولوشن در شبکه کانولوشنال

(Figure-3): The function of convolution layer in CNN network

همان‌گونه که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، شاخص‌های لایه کانولوشن و به‌ویژه ضرایب صافی‌های این لایه نقش مهمی در استخراج مؤثرتر ویژگی‌های تصویر و در نتیجه طبقه‌بندی دقیق‌تر تصاویر دارند. چراکه نقشه‌های ویژگی در خروجی لایه کانولوشن در واقع، همان ویژگی‌های استخراج‌شده از تصویر ورودی هستند که پس از انجام عملیات کاهش بُعد به لایه‌های طبقه‌بندی شبکه ارسال می‌شوند. مطالعات ما نشان می‌دهند که در حالت مرسوم، ضرایب صافی‌های لایه کانولوشن (همانند وزن‌ها و بایاس-های نورون‌ها در شبکه‌های عصبی) در شروع آموزش شبکه مقادیر تصادفی می‌گیرند و صافی‌هایی با ضرایب تصادفی را می‌سازند [۳۴]. اما، شروع آموزش شبکه با صافی‌های تصادفی می‌تواند کارایی شبکه کانولوشنال را کاهش دهد، چراکه این صافی‌ها نمی‌توانند تمامی ویژگی‌های مهم در تصاویر ورودی را استخراج کنند. برای حل این مشکل در الگوی پیشنهادی از یک بانک فیلتر برای سازمان‌دهی صافی‌های لایه کانولوشن استفاده شده است. در این بانک فیلتر، در شروع آموزش شبکه صافی‌هایی برای لایه کانولوشن استفاده شده است که نخست، تمامی ویژگی‌های تصاویر ورودی که بر دقت طبقه‌بندی مؤثرند، استخراج شوند، دوم، شباهت بین صافی‌ها به کمترین حد برسد و سوم، بسته به مسئله طبقه‌بندی ویژگی‌هایی اختصاصی‌تر و مؤثرتر از تصاویر ورودی استخراج شود. برای روشن‌تر شدن موضوع، در ادامه نمونه‌هایی از صافی‌های تصادفی و صافی‌های به‌کاررفته در بانک فیلتر پیشنهادی به‌طور دقیق‌تر معرفی شده‌اند.

الف) صافی‌های تصادفی:

برای تولید صافی‌های تصادفی پس از تعیین تعداد و ابعاد صافی‌های هر لایه کانولوشن در شبکه کانولوشنال از دستورهای تولید اعداد تصادفی (مانند توابع rand یا randn در نرم‌افزار MATLAB) استفاده می‌شود. این دستورهای صافی‌هایی با ضرایب به‌طور کامل تصادفی

باتوجه به مطالب بیان شده، منطقی به نظر می‌رسد که آموزش شبکه از نقطه‌ای مناسب‌تر و توسط صافی‌هایی با ضرایب از پیش تعیین شده شروع شود. به این منظور، در این مقاله از یک بانک فیلتر برای تخصیص صافی‌های کارآمد و خاص مسئله برای لایه‌های کانولوشن استفاده شده است.

(ب) بانک فیلتر:

برای تولید یک بانک فیلتر می‌توان بر اساس ویژگی‌های موردنظر در تصویر از صافی‌های متنوعی استفاده کرد. به عنوان مثال، در مسئله تشخیص ارقام دست‌نویس لبه‌ها، گوشه‌ها و زوایای خطوط در جهت‌های مختلف ویژگی‌های مهمی هستند که در طبقه‌بندی و تمییز اعداد از یکدیگر کاربرد دارند. از این رو، می‌توان تأکید بیشتری بر صافی‌های لبه‌بردار و صافی‌های حساس به فرکانس‌های بالا داشت. شکل (۵) چند نمونه از صافی‌های طراحی شده با ابعاد 5×5 را که در لایه کانولوشن الگوی پیشنهادی استفاده شده است، نشان می‌دهد.

0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
(1)					(2)				
-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	-0.04
-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04
-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	0.20	-0.04
-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	0.20
(3)					(4)				
-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	0.20	0.045	0.0467	0.056	0.047	0.045
-0.04	-0.04	-0.04	0.20	-0.04	0.047	0.317	0.715	0.317	0.047
-0.04	-0.04	0.20	-0.04	-0.04	0.056	0.715	-4.90	0.715	0.056
-0.04	0.20	-0.04	-0.04	-0.04	0.047	0.317	0.715	0.317	0.047
0.20	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	0.045	0.047	0.056	0.047	0.045
(5)					(6)				

(شکل-۵): چند نمونه صافی طراحی شده با ابعاد 5×5 برای

نخستین لایه کانولوشن در الگوی پیشنهادی. (۱) صافی میانگین‌یاب، (۲) لبه‌یاب افقی، (۳) لبه‌یاب عمودی، (۴) لبه‌یاب 45° ، (۵) لبه‌یاب -45° ، (۶) صافی لگاریتمی.

(Figure-5): Examples of the designed filters for the first convolution layer of the proposed model

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، ضرایب صافی‌ها در این حالت به‌طور کامل، هدفمند تعیین می‌شوند. به‌طوری‌که هر صافی بتواند ویژگی خاصی را از تصویر ورودی استخراج کند. در این شکل صافی‌های اول

تا ششم به ترتیب میانگین تصویر، لبه‌های افقی، لبه‌های عمودی، لبه‌های مورب در زوایای $\pm 45^\circ$ و لبه‌های دوجانبه را استخراج می‌کنند. اگرچه در حالت کلی، بانک فیلتر می‌تواند بر اساس مسئله طبقه‌بندی، محتوای تصاویر ورودی و ویژگی‌های موردنظر در آن‌ها از صافی‌هایی با ابعاد و محتوای متفاوتی تشکیل شود و با یک فراخوانی ساده به‌عنوان صافی‌های لایه کانولوشن استفاده شود. در الگوی پیشنهادی ما از یک بانک فیلتر که دارای ۱۶ صافی 5×5 بود، استفاده کردیم.

۳-۲-۲ - تابع فعال‌سازی یا واحد یک‌سوساز خطی^۱

تابع فعال‌سازی یا واحد یک‌سوساز خطی در واقع خروجی یک نورون عصبی را در لایه‌های کانولوشن شبکه کانولوشنال الگوسازی می‌کند. این تابع فعال‌سازی به‌طور معمول، بلافاصله بعد از هر لایه کانولوشن به‌کاربرده می‌شود و بر روی نقشه‌های ویژگی تأثیر می‌گذارد. این تابع ویژگی غیرخطی بودن را به شبکه اضافه می‌کند. مطالعات نشان داده‌است که روش استاندارد برای الگوسازی خروجی نورون‌ها در شبکه‌های عصبی مصنوعی از طریق معادله (۳) انجام می‌پذیرد.

$$f(x) = \tanh(x) \quad \text{or} \quad (1 + e^{-x})^{-1} \quad (3)$$

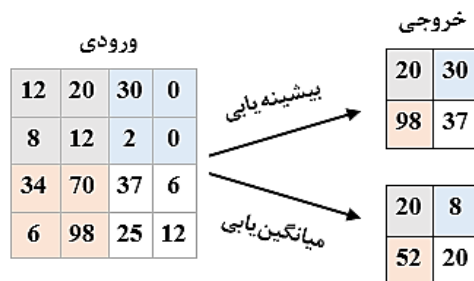
در این رابطه x ورودی نورون و $f(x)$ خروجی نورون است. اما استفاده از این رابطه در شبکه‌های کانولوشنال با حجم بالای نورون‌ها سبب کاهش چشمگیر سرعت شبکه می‌شود. بنابراین، در عمل به‌جای استفاده از این رابطه از واحد یک‌سوساز خطی استفاده می‌شود. معادله (۴) تابع تبدیل یک واحد یک‌سوساز خطی را نشان می‌دهد:

$$f(x) = \max(0, x) = \begin{cases} x & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

باتوجه به معادله (۴) تابع فعال‌سازی یک‌سوساز خطی عملیاتی عنصر به عنصر را بر روی نقشه‌های ویژگی انجام می‌دهد و به‌جای هر پیکسل با مقدار منفی، پیکسلی با مقدار صفر را جایگزین می‌کند. این امر با توجه به نقش کمتر پیکسل‌های دارای شدت روشنایی منفی در تصویر قابل توضیح است. در الگوی پیشنهادی نیز در خروجی هر لایه کانولوشن از یک تابع فعال‌سازی یک‌سوساز خطی استفاده شده‌است.

¹ Rectified Linear Unit (ReLU)

لایه نمونه بردار کاهنده وظیفه انتخاب (کاهش) ویژگی را در شبکه های کانولوشنال بر عهده دارد و به طور معمول در معماری این شبکه ها پس از هر لایه کانولوشن قرار می گیرد. ورودی این لایه نقشه های خام ویژگی و خروجی آن نقشه هایی با ابعاد کوچک تر از ویژگی های مؤثرتر است. به عبارت دیگر، در این لایه عرض و ارتفاع فریم ها کاهش یافته و شاخص های شبکه و به دنبال آن حجم محاسبات شبکه، کمتر می شود تا از بیش برآزش شبکه نیز جلوگیری شود. در این لایه یک پنجره با ابعاد مشخص از ورودی (نقشه ویژگی) جدا می شود و به کمک مقادیر داخل آن یک مقدار به عنوان خروجی انتخاب و یا محاسبه می شود. میانگین یابی و بیشینه یابی رایج ترین نوع عملیات نمونه برداری هستند. در میانگین یابی مقدار میانگین امان ها در پنجره جدا شده محاسبه می شود و در بیشینه یابی مقدار بیشینه به عنوان خروجی در نظر گرفته می شود. عملیات نمونه برداری در لایه نمونه بردار کاهنده همانند لایه کانولوشن دارای شاخص های گام و پدینگ است و محاسبه ابعاد خروجی آن نیز از معادله (۲) پیروی می کند. شکل (۵) عملکرد لایه نمونه بردار کاهنده را در دو حالت میانگین یابی و بیشینه یابی مقایسه می کند.



(شکل-۶): مقایسه عملکرد لایه نمونه بردار کاهنده در دو حالت میانگین یابی و بیشینه یابی (گام = ۲؛ پدینگ = ۰؛ ابعاد پنجره = ۲×۲)

(Figure-6): Comparison of the Pooling layer performance in the two modes of averaging and maximizing

همان طور که شکل (۶) نشان می دهد، ابعاد نقشه های ویژگی در عبور از لایه نمونه بردار کاهنده کاهش می یابد. به عنوان مثال، با استفاده از صافی هایی با اندازه ۲×۲ به همراه گام ۲، عرض و ارتفاع هر فریم ورودی نصف شده، و ۷۵ درصد مقادیر موجود در آن حذف می شود. در الگوی پیشنهادی پس از آزمایش های متعدد عملکرد لایه نمونه بردار کاهنده در حالت بیشینه یابی تنظیم شده است.

لایه های طبقه بندی در معماری مرسوم شبکه های کانولوشنال از نوع لایه های به طور کامل پیوسته با نورون-هایی دارای وزن ها و بایاس های آموزش پذیر هستند. به عبارت دیگر، نورون هایی که در یک لایه به طور کامل پیوسته قرار دارند با تمام نورون های موجود در لایه قبل از خود ارتباط دارند. لایه های به طور کامل متصل اغلب، بلافاصله پس از آخرین لایه کانولوشن قرار می گیرند و هدف اصلی آن ها انجام طبقه بندی بر اساس ویژگی های استخراج شده از آخرین لایه کانولوشن است. برای استفاده از این لایه ها در ساختار شبکه کانولوشن نخست، خروجی آخرین لایه کانولوشن در یک لایه به نام لایه مسطح ساز^۱ به یک بردار یک بعدی از ویژگی ها تبدیل شده و سپس این ویژگی ها برای طبقه بندی وارد لایه های به طور کامل پیوسته، می شوند. تعداد لایه های به طور کامل متصل و تعداد نورون های هر کدام جزء فراشاخص های شبکه هستند و بر اساس پیچیدگی مسئله و تعداد رده های خروجی تعیین می شوند. در الگوی پیشنهادی تعداد لایه های به طور کامل پیوسته متغیر در نظر گرفته شد و تعداد بهینه این لایه ها و تعداد نورون های آن ها با انجام آزمایش مشخص شد.

۳- الگوریتم آموزش

آموزش شبکه های کانولوشنال به معنی تصحیح شاخص های آموزش پذیر شبکه بر اساس خطای محاسبه شده در خروجی است. در این شبکه ها آموزش به صورت نظارت شده^۲ است و بر اساس زوج ورودی-خروجی صحیح انجام می شود. به این منظور، نخست، شاخص های شبکه (شامل ضرایب صافی های لایه های کانولوشن، وزن و بایاس های لایه های به طور کامل پیوسته و...) مقداردهی اولیه می شوند، سپس یک ورودی به شبکه اعمال و خروجی شبکه بر اساس وزن های اولیه محاسبه می شود و در نهایت، اختلاف خروجی به دست آمده با خروجی درست محاسبه، و این خطا به سمت عقب برگشته و شاخص ها را در جهت کاهش خطا اصلاح می کند. این فرایند آن قدر تکرار می شود تا خطای خروجی به کمترین مقدار خود برسد. پس از این فرایند شبکه آموزش یافته به وسیله داده-هایی که در فرایند آموزش حضور نداشته اند و به عنوان

¹ Flatten

² Supervised

داده‌های اعتبارسنجی کنار گذاشته شده‌بودند، اعتبارسنجی می‌شود. در الگوی پیشنهادی از الگوریتم پس‌انتشار خطا برای تصحیح شاخص‌های شبکه استفاده شده‌است.

۴- آزمایش‌ها

در پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر ضرایب اولیه صافی‌های لایه کانولوشن بر عملکرد شبکه‌های کانولوشنال و ارزیابی عملکرد الگوی پیشنهادی مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در دو گروه مجزا انجام شد. در گروه نخست آزمایش‌ها، یک شبکه کانولوشنال ساده تنها با یک لایه کانولوشن و در گروه دوم آزمایش‌ها یک شبکه کانولوشنال با سه لایه کانولوشن پیاده‌سازی و عملکرد آن‌ها در سه حالت مختلف صافی‌گذاری در لایه کانولوشن (نخستین لایه کانولوشن) مقایسه شد. سه نوع صافی‌گذاری عبارت بودند از: صافی‌های تصادفی، صافی‌های ثابت (با ضرایب یکسان) و صافی‌های ازپیش‌طراحی‌شده در یک بانک فیلتر. برای هر حالت از صافی‌گذاری شبکه پنجاه بار به‌وسیله ورودی‌هایی با ترتیب تصادفی آموزش داده‌شد و میانگین و بهترین دقت طبقه‌بندی شبکه ثبت شد. لایه کانولوشن این شبکه‌ها ۱۶ صافی با ابعاد ۵×۵ داشت. صافی‌های تصادفی شامل اعداد تصادفی در بازه $[-1, +1]$ بودند و در هر بار اجرا به‌صورت تصادفی (با دستور randn) مقداره‌ی می‌شدند؛ صافی‌های ثابت شامل یک عدد ثابت در بازه $[-1, +1]$ بودند و در هر بار اجرا این مقدار تغییر می‌کرد؛ و در نهایت، صافی‌های به‌کاررفته در بانک فیلتر ترکیبی از صافی‌های لبه‌بردار مختلف در جهت‌های افقی، عمودی و $\pm 45^\circ$ درجه، صافی‌های میانگین‌گیر و غیره بود که امکان استخراج ویژگی‌های متنوع تصاویر ورودی را فراهم می‌کرد.

۴-۱- شبکه کانولوشنال تک‌لایه پیشنهادی

جدول (۱) جزئیات دقیق پیکربندی شبکه کانولوشنال یک لایه پیشنهادی را که پس‌از انجام آزمایش‌های متعدد تنظیم شده‌اند، نشان می‌دهد.

همان‌طورکه جدول (۱) نشان می‌دهد، الگوی پیشنهادی در این حالت دارای یک لایه کانولوشن با ۱۶ صافی ۵×۵ و تابع فعال‌سازی یکسوساز خطی، یک لایه نمونه‌بردار کاهنده با پنجره‌های ۳×۳ و گام ۲، دو لایه به‌طور کامل پیوسته به‌ترتیب با صد و پنجاه نورون و در نهایت، لایه

خروجی با ده نورون و تابع فعال‌سازی بیشینه هموار^۱ بود. جدول (۲) دقت طبقه‌بندی تصاویر پایگاه داده MNIST به‌وسیله این الگو با سه نوع صافی‌گذاری متفاوت در لایه کانولوشن را نشان می‌دهد.

(جدول-۱): پیکربندی شبکه کانولوشنال یک لایه پیشنهادی
(Table-1): the configuration of the suggested single-layer CNN network

لايه‌ها	Size	N	S	P	A.F	O
input	-	-	-	-	-	۲۸×۲۸
Conv1	۵×۵	۱۶	۲×۲	۰	RELU	۱۳×۱۳×۱۶
Pooling	۳×۳	-	۲×۲	۰	Max	۶×۶
Flatten	-	-	-	-	-	۵۷۶×۱
FC1	-	۱۰۰	-	-	Relu	۱۰۰×۱
FC2	-	۵۰	-	-	Relu	۵۰×۱
Output	-	۱۰	-	-	Softmax	۱۰×۱

* توضیحات:

Size: ابعاد صافی‌ها؛ N: تعداد صافی‌ها و یا نورون‌ها؛ S: گام؛ P:

پدینگ؛ A.F: تابع فعال‌سازی؛ O: ابعاد خروجی

(جدول-۲): مقایسه عملکرد شبکه کانولوشنال یک‌لایه با سه

نوع صافی‌گذاری متفاوت در نخستین لایه کانولوشن

(Table-2): Comparing the performance of a single-layer CNN network with three different types of filters in the first convolution layer

نوع صافی‌گذاری	میانگین دقت (%)	بیشترین دقت (%)
ثابت	۷۴/۹۴	۷۶/۷۲
تصادفی	۸۶/۴۷	۹۰/۱۶
بانک فیلتر	۹۱/۸۹	۹۳/۳۵

مقادیر به‌دست‌آمده در جدول (۲) نشان می‌دهند ضرایب اولیه صافی‌های لایه کانولوشن نقش مؤثری بر دقت طبقه‌بندی شبکه کانولوشنال داشته‌اند. به‌طوری‌که میانگین دقت شبکه در حالتی که تمامی صافی‌ها ضرایب یکسان و ثابت داشته‌اند، به‌شدت پایین (۷۴/۹۴ درصد) بوده‌است. این نتایج همچنین، نشان می‌دهند که طراحی هدفمند صافی‌ها به‌وسیله یک بانک فیلتر در این لایه با استخراج ویژگی‌های مناسب‌تر و سمت‌وسودادن به الگوریتم آموزش، دقت طبقه‌بندی را افزایش داده‌است؛ به‌طوری‌که میانگین دقت طبقه‌بندی با صافی‌های تصادفی ۸۶/۴۷

¹ Softmax

درصد و با استفاده از صافی‌های به‌کارگرفته‌شده در بانک فیلتر ۹۱/۸۹ درصد بوده‌است. سپس برای تعیین اینکه آیا میانگین‌های بدست آمده از نظر آماری اختلاف معناداری داشته‌اند یا خیر، از آزمون t استفاده شد. نتایج این آزمون نشان داد که میانگین دقت مدل پیشنهادی در حالت بکارگیری بانک فیلتر در سطح معناداری ۰/۹۹ هم از فیلترهای ثابت و هم از فیلترهای تصادفی بیشتر بوده است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که بکارگیری بانک فیلتر در لایه‌ی کانولوشن شبکه‌ی تک لایه به طور معناداری سبب افزایش دقت طبقه‌بندی می‌شود.

۲-۴- شبکه کانولوشنال سه‌لایه پیشنهادی

در گروه دوم آزمایش‌ها، یک شبکه کانولوشنال با سه لایه کانولوشن پیاده‌سازی و همانند آزمایش‌ها قبل عملکرد آن در سه حالت مختلف صافی‌گذاری (در اولین لایه کانولوشن شبکه) مقایسه شد. در مقاله [۲۸] بهترین پیکربندی شبکه کانولوشنال سه‌لایه در طبقه‌بندی ارقام دست‌نویس MNIST ارائه شده‌است. در آزمایش‌های این بخش از این پیکربندی استفاده و شبکه کانولوشنال با همان مشخصات پیاده‌سازی شده‌است. جدول (۳) جزئیات دقیق پیکربندی شبکه کانولوشنال سه‌لایه پیشنهادی را نشان می‌دهد.

(جدول-۳): پیکربندی شبکه کانولوشنال سه‌لایه پیشنهادی
(Table-3): the configuration of suggested three-layer CNN network

لایه‌ها	Size	N	S	P	A.F	O
input	-	-	-	-	-	۲۸×۲۸
Conv1	۵×۵	۱۶	۱×۱	۲	RELU	۲۸×۲۸×۱۶
Pooling1	۳×۳	-	۲×۲	۱	Max	۱۴×۱۴
Conv2	۳×۳	۱۰	۱×۱	۱	RELU	۱۴×۱۴×۱۰
Pooling2	۳×۳	-	۲×۲	۱	Max	۷×۷
Conv3	۳×۳	۵	۱×۱	۱	RELU	۷×۷×۵
Pooling3	۳×۳	-	۲×۲	۱	Max	۴×۴
Flatten	-	-	-	-	-	۱۶×۱
FC1	-	۵۰	-	-	Relu	۵۰×۱
FC2	-	۲۵	-	-	Relu	۲۵×۱
Output	-	۱۰	-	-	Softmax	۱۰×۱

همان‌طور که جدول (۳) نشان می‌دهد، الگوی پیشنهادی در این حالت دارای سه لایه کانولوشن، سه لایه نمونه‌بردار کاهنده، دو لایه به‌طور کامل پیوسته و در نهایت، یک لایه خروجی است. جدول (۴) دقت طبقه‌بندی تصاویر پایگاه داده MNIST به‌وسیله این الگو با سه نوع صافی‌گذاری متفاوت در لایه کانولوشن را نشان می‌دهد.

(جدول-۴): مقایسه عملکرد شبکه کانولوشنال سه‌لایه با سه

نوع صافی‌گذاری متفاوت در نخستین لایه کانولوشن

(Table-4): Comparing the performance of a three-layer CNN network with three different types of filters in the first convolution layer

نوع صافی‌گذاری	میانگین دقت (%)	بیشترین دقت (%)
ثابت	۸۸/۸۲	۹۳/۶۹
تصادفی	۹۶/۱۶	۹۷/۸۸
بانک فیلتر	۹۹/۱۴	۹۹/۸۶

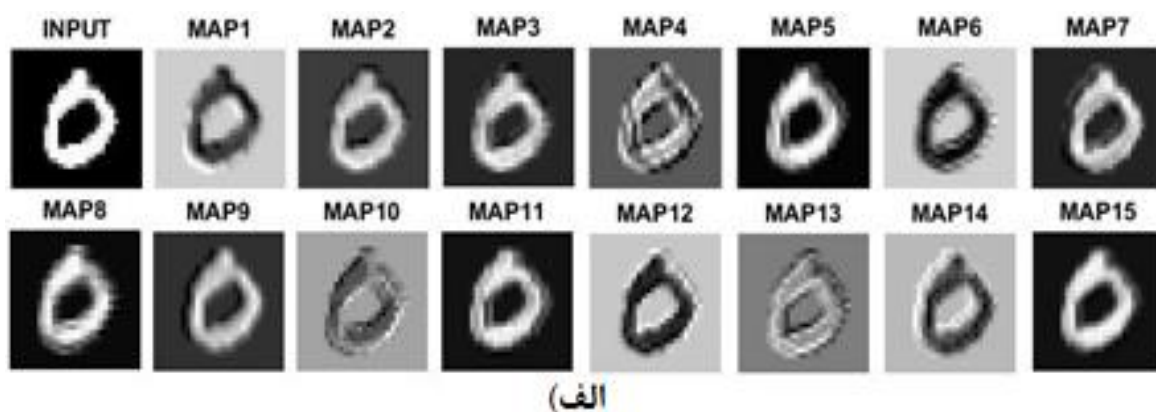
مقادیر به‌دست‌آمده در جدول (۴) نیز نشان می‌دهند که ضرایب اولیه صافی‌ها در اولین لایه کانولوشن شبکه‌های کانولوشنال چندلایه، نقش مؤثری بر دقت طبقه‌بندی این شبکه‌ها داشته‌اند. با توجه به این نتایج، میانگین دقت شبکه‌ای که به‌صورت هدفمند از بانک فیلتر استفاده می‌کند، ۹۹/۱۴ درصد و بالاترین دقت آن ۹۹/۸۶ درصد بوده‌است. سپس برای تعیین اینکه آیا میانگین‌های بدست آمده از نظر آماری اختلاف معناداری داشته‌اند یا خیر، بار دیگر از آزمون t استفاده شد. نتایج این آزمون نشان داد که میانگین دقت مدل پیشنهادی در حالت بکارگیری بانک فیلتر در سطح معناداری ۰/۹۵ هم از فیلترهای ثابت و هم از فیلترهای تصادفی بیشتر بوده است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که بکارگیری بانک فیلتر در اولین لایه کانولوشن شبکه‌های چند لایه نیز به طور معناداری سبب افزایش دقت طبقه‌بندی می‌شود.

۵- یافته‌ها و بحث

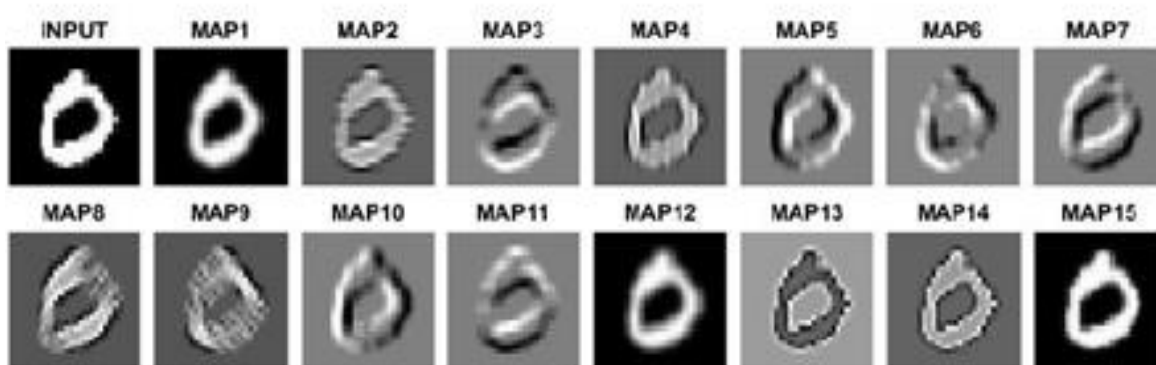
امروزه شبکه‌های کانولوشنال به‌طور روزافزون در کاربردهای مختلف بینایی ماشین و به‌ویژه در شناسایی و طبقه‌بندی تصاویر استفاده می‌شوند. این نوع از شبکه‌های عصبی مصنوعی با شبیه‌سازی عملکرد قشر بینایی مغز قدرتمندترین ساختار را در تجزیه و تحلیل داده‌های بصری دارند. اما گستردگی تصاویر دیجیتال و تنوع محتوا و ویژگی‌های موجود در آن‌ها مستلزم طراحی تخصصی و

صافی تصادفی با تصویر ورودی بوده و نقشه‌های ویژگی استخراج شده در اولین لایه کانولوشن را نشان می‌دهند. مقایسه نقشه‌های ویژگی استخراج شده در شکل‌های (۷) و (۸) نشان می‌دهد که صافی‌های مورد استفاده در بانک فیلتر نسبت به صافی‌های تصادفی توانسته‌اند طیف وسیع‌تری از ویژگی‌های مهم را استخراج و در مجموع ویژگی‌های مؤثرتر و معنادارتری از تصویر ورودی را استخراج کنند. به عنوان مثال، نقشه‌های ویژگی یک، شش و ده، که به وسیله صافی‌های تصادفی ایجاد شده‌اند، توانایی زیادی در استخراج ویژگی‌های تصویر ورودی نداشته‌اند. مقایسه این تصاویر همچنین، نشان می‌دهد که تنوع ویژگی‌های استخراج شده به وسیله صافی‌های موجود در بانک فیلتر بسیار بیشتر از صافی‌های تصادفی بوده‌است. به طوری که برخی از این صافی‌ها ویژگی‌های فرکانس پایین و برخی دیگر ویژگی‌های فرکانس بالا را در تصویر به خوبی استخراج کرده‌اند.

دقیق این شبکه‌ها برای دستیابی به کارایی بالاتر است [۳۵]. در این راستا، در پژوهش حاضر تلاش شد تا دقت شبکه‌های کانولوشنل در طبقه‌بندی تصاویر با اختصاصی کردن صافی‌های لایه کانولوشن به عنوان مهم‌ترین رکن استخراج ویژگی در این شبکه‌ها افزایش یابد. این کار از طریق طراحی مجموعه‌ای از صافی‌ها در قالب یک بانک فیلتر انجام شد. آزمایش‌های ما بر روی شبکه‌های کانولوشنل با یک و سه لایه کانولوشن نشان داد که به کارگیری صافی‌های تخصصی در نخستین لایه کانولوشن شبکه سبب استخراج ویژگی‌های مؤثرتر از تصاویر و افزایش قدرت و کارایی شبکه در طبقه‌بندی تصاویر می‌شود. برای فهم بهتر چگونگی عملکرد بانک فیلتر و مقایسه آن با صافی‌های تصادفی، خروجی اولین لایه کانولوشن شبکه در شکل (۷) و خروجی آن پس از اعمال تابع فعال‌سازی یکسوساز خطی در شکل (۸) نشان داده شده‌است. این تصاویر نتایج حاصل از کانولوشن ۱۵ صافی غیرتصادفی در بانک فیلتر و ۱۵

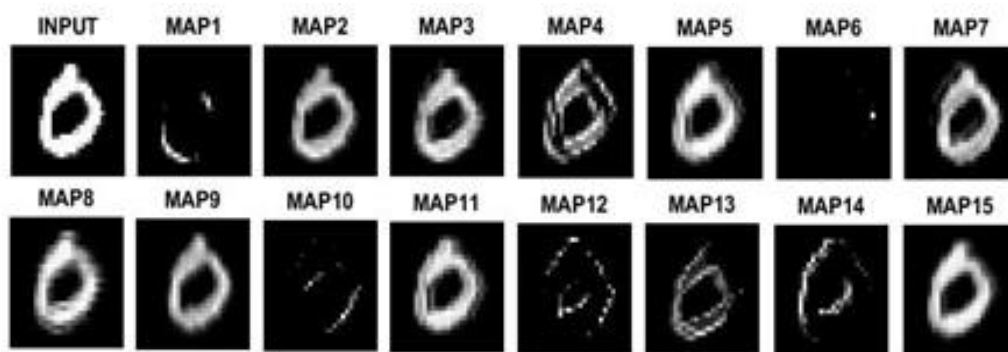


(الف)

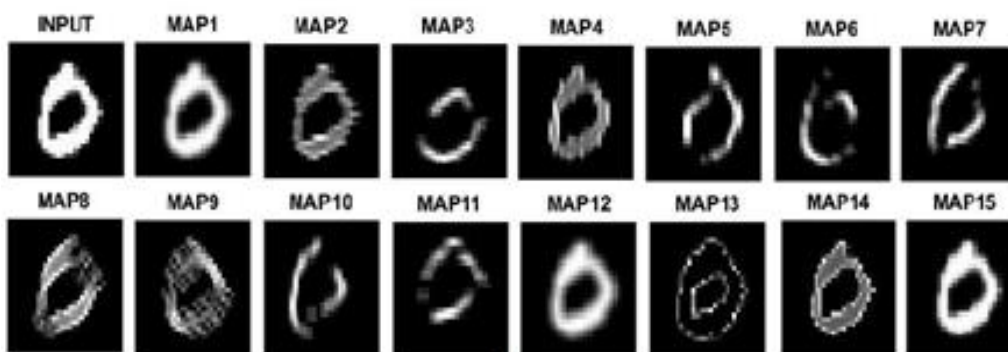


(ب)

(شکل ۷-۷): مقایسه خروجی نخستین لایه کانولوشن (نقشه‌های ویژگی). (الف) صافی‌های تصادفی، (ب) بانک فیلتر
(Figure-7): Comparison of the output of the first convolution layer (feature maps). A) Random filters, b) Filter bank



(الف)



(ب)

(شکل-۸): مقایسه خروجی اولین لایه کانولوشن پس از اعمال تابع فعال‌سازی یکسوساز خطی. الف) صافی‌های تصادفی، ب) بانک فیلتر

(Figure-8): Comparison of the output of the first RELU layer. A) Random filters, b) Filter bank

(جدول-۵): مقایسه عملکرد روش پیشنهادی با برخی از

مطالعات گذشته

(Table-5): Comparing the performance of the proposed method with some past studies

پژوهش	روش	پایگاه داده	دقت (%)
LeCun و همکارانش [۲۳]	CNN	Self-Created	۹۹
Simard و همکارانش [۲۴]	CNN MLP	MNIST	۹۹/۶ ۹۹/۳
Saqib و همکارانش [۳۰]	CNN+ELM	MNIST	۹۹/۸
Calderon و همکارانش [۳۱]	CNN + Gabor filters	MNIST	۹۹/۳۲
Le و همکارانش [۳۲]	CNN+SGD	MNIST	۹۹/۳۱
پژوهش حاضر	CNN + Filter Bank	MNIST	۹۹/۱۴

همانطور که در جدول (۵) مشاهده می‌شود، دقت کلاس-بندی تصاویر اعداد دست‌نویس در روش پیشنهادی (شبکه

۱-۵- مقایسه با سایر روش‌ها

مطالعه پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که بهبود عملکرد شبکه‌های کانولوشنال برای تشخیص و طبقه‌بندی تصاویر اعداد و یا نویسه‌های دست‌نویس مورد توجه بسیاری از پژوهش‌گران بوده است. اما با این وجود، به کارگیری صافی‌های از قبل طراحی شده برای لایه‌های کانولوشن شبکه در هیچ پژوهشی بررسی نشده است. تنها پژوهش نزدیک به مطالعه حاضر توسط Calderon و همکارانش انجام شده است [۳۱]. آن‌ها پیشنهاد استفاده از صافی‌های گابور را در اولین لایه کانولوشن شبکه‌های کانولوشنال مطرح کرده و نشان داده‌اند که این صافی‌ها بر دقت طبقه‌بندی شبکه مؤثرند. به منظور نشان دادن عملکرد روش پیشنهادی و اثبات کارایی شبکه‌های کانولوشنال مبتنی بر بانک فیلتر، علاوه بر آزمایش‌هایی که در بخش قبل انجام شد، دقت روش پیشنهادی با برخی از پژوهش‌های گذشته، که از شبکه‌های کانولوشنال برای تشخیص اعداد دست‌نویس پایگاه داده MNIST استفاده کرده بودند، مقایسه شد. در جدول (۵) دقت شبکه کانولوشنال سه لایه پیشنهادی که در آن از بانک فیلتر استفاده شده است، با برخی از کارهای گذشته در این زمینه مقایسه شده است.

کانولوشنال ۳ لایه به همراه بانک فیلتر) بسیار نزدیک به سایر روش‌های معرفی‌شده در مطالعات اخیر بوده است. با این تفاوت که در روش پیشنهادی تعداد لایه‌ها و حجم محاسباتی بسیار کمتر بوده و شبکه پیشنهادی تنها با سه لایه کانولوشن و به کمک بانک فیلتر به دقت قابل قبولی رسیده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید برای بهبود عملکرد شبکه‌های کانولوشنال در طبقه‌بندی تصاویر ارائه شد. در الگوی پیشنهادی، با توجه به نقش اساسی لایه‌های کانولوشن (و به‌ویژه ضرایب صافی‌های آن) در استخراج ویژگی‌های مؤثر از تصاویر و تأثیرات مستقیم آن‌ها بر عملکرد و دقت شبکه، از یک بانک فیلتر استفاده شد. بانک فیلتر امکان طراحی صافی‌های لایه کانولوشن را به صورت خاص مسئله و مبتنی بر ویژگی‌های تصاویر ورودی فراهم می‌آورد. در این روش به جای وزن‌دهی تصادفی به ضرایب صافی‌های لایه کانولوشن در آغاز آموزش شبکه، ضرایب صافی‌ها به‌طور دقیق‌تر، متنوع‌تر و خاص مسئله مقداردهی شدند. استفاده از بانک فیلتر پیچیدگی‌های اضافی به شبکه تحمیل نمی‌کند، با شروع آموزش شبکه از نقطه بهینه مدت‌زمان آموزش را کاهش می‌دهد، کارایی لایه کانولوشن را با به کمترین حد رساندن ویژگی‌های مشابه و افزایش ویژگی‌های مؤثر افزایش می‌دهد و در نهایت امکان طراحی لایه‌های کانولوشن شبکه را برای استخراج ویژگی‌های مبتنی بر محتوای تصویر فراهم می‌کند، و در نتیجه دقت طبقه‌بندی را افزایش می‌دهد. در این پژوهش بررسی‌های انجام‌شده بر روی تصاویر پایگاه داده اعداد دست‌نویس MNIST نشان داد که استفاده از بانک فیلتر به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای دقت شبکه کانولوشنال را در طبقه‌بندی تصاویر افزایش می‌دهد. به‌طوری‌که هم برای شبکه‌های کانولوشنال تک‌لایه و هم برای شبکه‌هایی با تعداد بیشتری لایه‌های کانولوشن، ضرایب اولیه صافی‌ها در اولین لایه کانولوشن بر دقت طبقه‌بندی تأثیرگذار بود. آزمایش‌ها بر روی شبکه کانولوشنال تک‌لایه با سه نوع صافی‌گذاری، صافی‌های مقدار ثابت، تصادفی و بانک فیلتر میانگین دقت طبقه‌بندی را در ۵۰ بار آموزش شبکه به ترتیب ۷۴/۹۴، ۸۶/۴۷ و ۹۱/۸۹ درصد و برای شبکه

کانولوشنال سه‌لایه به ترتیب ۸۸/۸۲، ۹۶/۱۶ و ۹۹/۱۴ درصد نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که (۱) ضرایب اولیه صافی‌های لایه کانولوشن بر دقت طبقه‌بندی شبکه مؤثر است؛

(۲) با به‌کارگیری صافی‌های مؤثرتر در لایه کانولوشن می‌توان شبکه کانولوشنال را خاص مسئله ساخته و از این طریق کارایی شبکه را افزایش داد. بنابراین، پیشنهاد می‌شود تا به‌جای استفاده از ضرایب تصادفی برای صافی‌های لایه‌های کانولوشن در شروع آموزش شبکه‌های کانولوشنال، این ضرایب برای استخراج مؤثرتر ویژگی‌های موردنظر در تصویر طراحی و مقداردهی شوند.

7-Refrence

۷- مراجع

- [1] Javidi, B., "Image recognition and classification: algorithms, systems, and applications". 2002: CRC press.
- [2] Lu D, Weng Q. "A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance". International journal of Remote sensing. 2007;28(5):823-70.
- [3] Nath, S.S., et al. "A survey of image classification methods and techniques". International conference on control, instrumentation, communication and computational technologies (ICCICCT). 2014, IEEE.
- [4] Dat, P.K.K.O., "Image Classification Difficulties".
- [5] Jain, G. and J. Ko, "Handwritten digits recognition". Multimedia Systems, Project Report, University of Toronto, 2008: p. 1-3.
- [6] Jain, A.K., R.P.W. Duin, and J. Mao, "Statistical pattern recognition: A review". IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2000. 22(1): p. 4-37.
- [7] Egmont-Petersen, M., D. de Ridder, and H. Handels, "Image processing with neural networks: a review". Pattern recognition, 2002. 35(10): p. 2279-2301.
- [8] Ghosh, M.M.A. and A.Y. Maghari. "A comparative study on handwriting digit recognition using neural networks". in 2017 international conference on promising electronic technologies (ICPET). 2017. IEEE.
- [9] Bala, R. and D. Kumar, "Classification using ANN: A review". Int. J. Comput. Intell. Res, 2017. 13(7): p. 1811-1820.
- [10] Bhatnagar, S., D. Ghosal, and M.H. Kolekar. "Classification of fashion article images using convolutional neural networks". in 2017 Fourth International Conference on Image Information Processing (ICIIP). 2017 IEEE.

- [26] Wan, L., et al. "Regularization of neural networks using dropconnect". in International conference on machine learning. 2013. PMLR.
- [27] Tabik, S., et al., "A snapshot of image pre-processing for convolutional neural networks: case study of MNIST". 2017.
- [28] Ahlawat, S., et al., "Improved handwritten digit recognition using convolutional neural networks (CNN)". Sensors, 2020. 20(12): p. 3344.
- [29] Ahlawat, S. and A. Choudhary, "Hybrid CNN-SVM classifier for handwritten digit recognition". Procedia Computer Science, 2020. 167: p.2554-2560.
- [30] Ali, S., et al., "An effective and improved CNN-ELM classifier for handwritten digits recognition and classification". Symmetry, 2020. 12(10): p. 1742.
- [31] Calderon, A., S. Roa, and J. Victorino, "Handwritten digit recognition using convolutional neural networks and gabor filters". Proc. Int. Congr. Comput. Intell, 2003: p. 1-9.
- [32] Le, Q.V., et al. "On optimization methods for deep learning". in ICML. 2011.
- [33] LeCun, Y., C. Cortes, and C.J. Burges, "The MNIST database of handwritten digits". Website. 1998.
- [34] Yamashita, R., et al., "Convolutional neural networks: an overview and application in radiology". Insights into imaging, 2018. 9(4): p. 611-629.
- [35] Cui, H. and J. Bai, "A new hyperparameters optimization method for convolutional neural networks". Pattern Recognition Letters, 2019. 125: p. 828-834.
- [11] Chen, F., et al., "Assessing four neural networks on handwritten digit recognition dataset (MNIST)". arXiv preprint arXiv:1811.08278, 2018.
- [12] Hubel, D.H. and T.N. Wiesel, "Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex". The Journal of physiology, 1962. 160(1): p. 106.
- [13] Fukushima, K., "Neural network model for selective attention in visual pattern recognition and associative recall". Applied Optics, 1987. 26(23): p. 4985-4992.
- [14] Momeny M, Sarram M A, Latif A, Sheikhpour R. A Convolutional Neural Network based on Adaptive Pooling for Classification of Noisy Images. JSDP 2021; 17 (4) :139-154.
- [15] Traore, B.B., B. Kamsu-Foguem, and F. Tangara, "Deep convolution neural network for image recognition". Ecological Informatics, 2018. 48: p. 257-268.
- [16] Duan, M., G. Wang, and C. Niu, "Method of small sample size image recognition based on convolution neural network". Computer Engineering and Design, 2018. 39(1): p. 224-229.
- [17] Zhou, X., et al. "Application of deep learning in object detection". in 2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS). 2017. IEEE.
- [18] Ren, S., et al., "Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks". Advances in neural information processing systems, 2015. 28.
- [19] Liu, Z., et al., "Salient object detection for RGB-D image by single stream recurrent convolution neural network". Neurocomputing, 2019. 363: p. 46-57.
- [20] Lang, R., L. Zhao, and K. Jia. "Brain tumor image segmentation based on convolution neural network". in 2016 9th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI). 2016. IEEE.
- [21] Sultana, F., A. Sufian, and P. Dutta, "Evolution of image segmentation using deep convolutional neural network: a survey". Knowledge-Based Systems, 2020. 201: p. 106062.
- [22] Al-Saffar, A.A.M., H. Tao, and M.A. Talab. "Review of deep convolution neural network in image classification". in 2017 International conference on radar, antenna, microwave, electronics, and telecommunications (ICRAMET). 2017. IEEE.
- [23] LeCun, Y., et al., "Gradient-based learning applied to document recognition". Proceedings of the IEEE, 1998. 86(11): p. 2278-2324.
- [24] Simard, P.Y., D. Steinkraus, and J.C. Platt. "Best practices for convolutional neural networks applied to visual document analysis". in Icdar. 2003.
- [25] Nielsen, M.A., "Neural networks and deep learning". Vol. 25. 2015: Determination press San Francisco, CA, USA.



محمدرضا کرمی ملایی، کارشناسی

خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک از دانشگاه فردوسی مشهد، کارشناسی ارشد خود را در رشته پردازش سیگنال از دانشگاه گرونوبل

فرانسه و دکتری خود را در رشته مهندسی پزشکی- بیوالکتریک از دانشگاه نانسی فرانسه دریافت کرده و هم‌اکنون دانشیار گروه مهندسی پزشکی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

mkarami@nit.ac.ir



محمدرضا حسن‌زاده، مدارک

کارشناسی تا دکتری خود را در رشته مهندسی برق الکترونیک به‌ترتیب از دانشگاه‌های صنعتی شریف، صنعتی

امیرکبیر و دانشگاه مازندران دریافت کرده و هم اکنون
استادیار گروه مهندسی برق الکترونیک، دانشکده مهندسی
برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل است.
نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

m.hasanzadeh@nit.ac.ir



علی دروگرمقدم، کارشناسی ارشد
خود را در رشته مهندسی پزشکی-
بیوالکتریک از دانشگاه حکیم سبزواری
در سال ۱۳۹۲ دریافت کرده و هم‌اکنون
در مرحله دفاع از رساله دکتری خود با
موضوع پیش‌بینی حمله‌های صرعی از روی سیگنال
الکتروانسفالوگرام به کمک شبکه‌های عصبی کانولوشنال
در همین رشته در دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل است.
وی به‌مدت سه سال عضو هیأت علمی (طرح سربازی)
پرديس فناوری‌های نوین دانشگاه حکیم سبزواری
بوده‌است.

نشانی رایانامه ایشان عبارت است از:

ali_derogarmoghadam@stu.nit.ac.ir