

بهبود الگوریتم ترکیبی فازی- مکانی برای حذف نویز نمک و فلفل باقابلیت حفظ جزئیات در تصاویر دیجیتال

روشنک زمان^۱ و رضا قاسمی نجف‌آبادی^{۲*}

چکیده

در بسیاری از حوزه‌های حیاتی از جمله پزشکی، نجوم و صنعت، تصاویر دیجیتال نقش اساسی ایفا می‌کنند و حفظ کیفیت آن‌ها در برابر عواملی مانند نویز از اهمیت بالایی برخوردار است. این مقاله ترکیبی نوین از پردازش مکانی و منطق فازی را در یک چارچوب یکپارچه ارائه می‌دهد. در اینجا، پیکسل‌ها به اعداد فازی تبدیل می‌شوند و از رابطه بین آن‌ها هنگام تغییر رنگ استفاده می‌گردد. بدین ترتیب، در پنجره پردازش، چهار دنباله مرتب (افقی، عمودی، دو مورب) از مقادیر پیکسل‌ها ایجاد می‌شود. سپس پیکسل‌های تخریب‌شده با استفاده از همسایه‌های موجود در پنجره پردازش بازسازی می‌شوند. در این فرایند، نزدیک‌ترین مقدار ممکن به مقدار واقعی پیکسل، بر اساس دنباله‌های مرتب‌شده استخراج می‌شود.

به منظور ارزیابی کیفیت بازسازی فیلتر پیشنهادی در تصاویر دارای نویز، رفتار دو معیار PSNR و SSIM بررسی گردید. آزمایش‌های عددی و بصری نشان می‌دهد که فیلتر پیشنهادی در حفظ کیفیت تصویر در شرایط نویز بالا، کارآمدتر است. از آنجایی که این الگوریتم بر پایه پردازش موضعی پنجره‌ای با ابعاد ثابت (3×3) عمل می‌کند و در آن برای هر پیکسل، عملیات مرتب‌سازی و انتخاب در چهار جهت انجام می‌شود، پیچیدگی محاسباتی آن به‌ازای یک تصویر با N پیکسل، از مرتبه $O(N)$ است. نتایج نشان می‌دهد این الگوریتم در مقایسه با روش‌های پیچیده‌تری مانند BCFM و TSVD، از نظر زمان اجرا و حافظه مصرفی کارآمدتر و کم‌هزینه‌تر است. در مقایسه با روش پایه (چارموتی)، هزینه محاسباتی بیشتری دارد (حدود ۸ تا ۱۰ برابر زمان اجرا و ۲ تا ۴ برابر حافظه)؛ با این حال این هزینه از نظر مطلق ناچیز است (کمتر از یک ثانیه و چند مگابایت) و در ازای آن، بهبود محسوسی در دقت بازسازی (SSIM و PSNR) ارائه می‌دهد؛ ضمن آنکه لبه‌ها و جزئیات تصویر را نیز به خوبی حفظ می‌کند.

کلیدواژه‌ها

پردازش تصویر، حذف نویز، رویکرد مکانی، نویز نمک و فلفل، منطق فازی

۱ مقدمه

پردازش تصویر دیجیتال نقشی حیاتی در طیف وسیعی از کاربردها در حوزه‌های پزشکی، نجوم و صنعت ایفا می‌کند. در این میان، حفظ کیفیت تصویر در برابر عوامل مخرب مانند نویز، از اهمیت بالایی برخوردار است [۲].

از این رو، ترمیم تصویر به منظور بازیابی کیفیت تصاویر آسیب‌دیده به یکی از زمینه‌های پژوهشی فعال در حوزه پردازش تصویر تبدیل شده است. نویز ممکن است در اثر فرایند دریافت تصویر، انتقال یا

این مقاله در ۲۵ مهر ۱۴۰۴ دریافت و در ۳ شهریور ۱۴۰۵ پذیرفته شد.

^۱ گروه آمار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، ایران، تهران.

r.zaman@pnu.ac.ir

^۲ گروه آمار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه پیام نور، ایران، تهران.

r.ghasemi62@pnu.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول: رضا قاسمی نجف‌آبادی



دسته، فیلترهایی مانند گاوسی^۴ [۱۱]، تغییرات کلی^۵ [۱۲]، فیلتر یاروسلاوسکی^۶ [۳]، فیلتر دوطرفه^۷ [۱۳]، فیلتر هدایت شده تصویر^۸ [۱۴]، فیلتر هدایت شده سریع^۹ [۱۵] و روش میانگین غیرمحلی^{۱۰} [۱۶ و ۱۷] قرار دادند که نویز را هموار کرده و لبه ها و بافت را حفظ می کنند. برخی از این مدل ها مبتنی بر معادلات دیفرانسیل جزئی، مانند انتشار ناهمسانگرد مرتبه دوم و چهارم مبتنی بر میدان الکتریکی مجازی کانولوشنی هستند که وانگ^{۱۱} و همکاران [۱۸ و ۱۹] برای حذف نویز تصویر از این روش و همچنین حذف نویز تصویر با استفاده از انتشار ناهمسانگرد مرتبه دوم و چهارم مبتنی بر کانولوشن بردار گرادیان استفاده شده است. فیلتر میانه اگرچه ساده است، اما هنوز در بسیاری از الگوریتم های جدید حذف نویز نمک و فلفل به کار می رود، خواه به صورت اصلاح شده یا ترکیبی، مانند: فیلتر میانه تعویضی فازی انطباقی^{۱۲} [۲۰]، فیلتر میانه اصلاح شده مبتنی بر تصمیم نامتقارن [۲۱]، فیلتر مبتنی بر چگالی پیکسل^{۱۳} [۲۲]، فیلتر میانه گرمسیری^{۱۴} [۲۳]، فیلتر میانه کاربردی متفاوت^{۱۵} [۲۴]، فیلتر انطباقی گرمسیری [۲۵].

دسته دوم، فیلترکردن در حوزه تبدیل است که توجه زیادی از سوی محققان و مطالعات به خود جلب کرده است. در این روش، تصویر در حوزه های غیر از حوزه اصلی پردازش می شود تا اطلاعات بیشتری از سیگنال استخراج گردد و فرایند حذف نویز با دقت بیشتری انجام شود. در این دسته، روش های متعددی از قبیل موجک ها [۲۶]، اتم های موجی [۲۷]، منحنی موجک ها [۲۸]، کانتور لت ها [۲۹]، وجملت ها [۳۰]، باندلت ها [۳۱] معرفی شده اند که تصویر به حوزه فرکانس تبدیل می شود.

دسته سوم، فیلترهای ترکیبی هستند که مزایای حوزه مکانی و تبدیل را با هم به کار می گیرند. به این ترتیب محدودیت های تکنیک های معمول را برطرف کرده و کارایی بهتری ارائه می دهد. فیلترهای ترکیبی متعددی توسط محققان پیشنهاد شده اند، مانند ترکیب موجک و تغییرات کلی [۳۲-۳۶]. همچنین، آسلیمی ضامنجان و همکاران [۱] با ترکیب ویژگی های محلی دودویی و شبکه های کانالوشنی عمیق، روش ترکیبی برای طبقه بندی بافت ها در حضور نویز ارائه دادند.

ذخیره سازی ایجاد شود [۳-۵]. این نویزها اگرچه منشأهای متفاوتی دارند، اما اثرات مشابهی بر تصویر از جمله کاهش وضوح جزئیات و ظهور دانه ها می گذارند [۶]. از این رو، دغدغه اصلی محققان در این زمینه، حل این مشکل با حذف نویز از تصویر آلوده و دستیابی به بهترین بازسازی از تصویر اصلی است، به گونه ای که ویژگی های تصویر حفظ شود [۷].

میزان نویز در یک تصویر آلوده بر اساس تعداد پیکسل های تخریب شده سنجیده می شود. تصاویر دیجیتال ممکن است تحت تأثیر انواع مختلفی از نویز قرار گیرند که از مهم ترین آنها می توان به نویز گاوسی، نویز پواسون، نویز اسپکل^۱ و نویز نمک و فلفل^۲ اشاره کرد. برای مطالعه بیشتر در مورد انواع دیگری از نویزهای اساسی که می توانند کیفیت تصاویر دیجیتال را تحت تأثیر قرار دهند می توان به [۸] مراجعه نمود.

تاکنون راهکارهای متعددی برای حذف نویز از تصاویر ارائه شده است، در حالی که هیچ یک به طور کامل موفق به حل این چالش نشده اند. از این راهکارها می توان به فیلترکردن تصویر به عنوان مرحله پیش پردازش اشاره نمود. این فرایند شامل مجموعه ای از عملیات روی تصویر است که با هدف بهبود کیفیت بصری، کاهش نویز، افزایش کنتراست و تشخیص لبه ها انجام می شود. این مراحل مقدماتی نه تنها کیفیت بصری تصویر را بهبود می بخشد، بلکه مراحل بعدی مانند فشرده سازی، تحلیل محتوا، طبقه بندی، کلاس بندی و استخراج اطلاعات را نیز تسهیل می کنند. فیلترکردن تصویر، نقش اساسی در آماده سازی داده های تصویری برای مراحل پیچیده تر پردازش ایفا می کند [۹].

تکنیک های حذف نویز به دو دسته اصلی تقسیم می شوند: حوزه مکانی و حوزه تبدیل که در برخی موارد با ترکیب این دو، فیلترهای هیبریدی ایجاد می شوند. چارموتی^۳ و همکاران [۱۰]، این طبقه بندی را به صورت نموداری ارائه داده اند.

فیلترکردن در حوزه مکانی، یک راهکار سنتی برای حذف نویز از تصویر است. این روش شامل مجموعه ای از عملیات ریاضی است که مستقیماً با پیکسل ها در صفحه تصویر کار می کنند، زیرا در این حوزه، سیگنال به وسیله پیکسل ها نمایش داده می شود. در این

^۱ Speckle Noise^۲ Salt-and-Pepper Noise^۳ Charmouti^۴ Gaussian filter^۵ total variation filter^۶ Yaroslavsky's filter^۷ bilateral filter^۸ Guided Image Filtering^{۱۰} Non local means^{۱۱} Wang^{۱۲} adaptive fuzzy switching median filter^{۱۳} based pixel density filter (BPDF)^{۱۴} tropical median filter (TMF)^{۱۵} tropical adaptive filter (TAF)

محدودیت‌های روش‌های تک‌بعدی و دستیابی به کارایی بالاتر در حذف نویز، حفظ جزئیات و کاهش پیچیدگی محاسباتی است. براین اساس، در مقاله‌ی حاضر، رویکرد مکانی معرفی شده در [۳۸] با بهره‌گیری از منطق فازی توسعه و بهبود داده شده است. در روش پیشنهادی، تلاش شده است کیفیت ترمیم تصاویر دیجیتال آلوده به نویز نمک و فلفل، با تأکید ویژه بر حفظ دقیق جزئیات و لبه‌های تصویر ارتقا یابد.

۲ برخی مفاهیم فازی

در دنیای واقعی، بسیاری از پارامترها با متغیرهای زبانی توصیف می‌شوند که بایستی بر اساس منطق فازی تعریف شوند. هر توصیف زبانی به یک تابع عضویت مربوط می‌شود که یک مجموعه فازی را تشکیل می‌دهد. در واقع، توابع عضویت به هر جز از مجموعه مرجع، یک عدد حقیقی در بازه [۰ و ۱] نسبت می‌دهند. این عدد، درجه‌ی عضو بودن آن جزء به یک مجموعه فازی را نشان می‌دهد. هر چه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، درجه عضویت عنصر در مجموعه فازی بیشتر خواهد بود. همچنین، یک جزء می‌تواند با درجه‌ای به عضویت یک مجموعه فازی و با درجه‌ای دیگر متعلق به مجموعه فازی دیگر باشد [۴۰]. در این بخش، برخی تعاریف اولیه فازی ارائه شده است.

تعریف ۱-۲ (مجموعه فازی). فرض کنید E یک مجموعه ناتهی باشد. یک مجموعه فازی $\tilde{A}$ در E با تابع عضویت آن تعریف می‌شود یعنی $\mu_{\tilde{A}}: E \rightarrow [0,1]$. درجه عضویت e در مجموعه فازی $\tilde{A}$ برای هر $e \in E$ تعریف می‌شود. این تابع با $\tilde{A}$ نیز نشان داده می‌شود. به عبارت دیگر $\tilde{A}: E \rightarrow [0,1]$.

تعریف ۲-۲ (تکیه‌گاه). فرض کنید $\tilde{A}$ یک مجموعه فازی از E باشد. تکیه‌گاه $\tilde{A}$ را با $supp(\tilde{A})$ نشان داده، اعضای آن همه e ‌های هستند که درجه عضویت آن‌ها بزرگ‌تر از صفر است. به بیان دیگر $supp(\tilde{A}) = \{e \in E | \tilde{A}(e) > 0\}$. (۱)

تعریف ۳-۲ (مجموعه فازی نرمال). مجموعه فازی $\tilde{A}$ از مجموعه E نرمال نامیده می‌شود، اگر e ای در آن وجود داشته باشد که درجه عضویت آن یک باشد یعنی $\tilde{A}(e) = 1$. در غیر این صورت، $\tilde{A}$ غیرنرمال خواهد بود.

تعریف ۴-۲ (آلفا برش). مجموعه α - برش از $\tilde{A}$ یک مجموعه غیرفازی است که آن را با $\tilde{A}_\alpha$ نشان داده می‌شود و تعریف ریاضی آن به صورت زیر است:

$$\tilde{A}_\alpha = \{e \in E | \tilde{A}(e) \geq \alpha\}. \quad (۲)$$

تعریف ۵-۲ (عدد فازی مثلی). مجموعه فازی $\tilde{A}$ ، عدد فازی مثلی نامیده می‌شود هر گاه تابع عضویت آن برابر باشد با:

مقاله حاضر به مسئله حذف نویز نمک و فلفل از تصاویر دیجیتال می‌پردازد. نویز نمک و فلفل نوعی نویز ضربه‌ای^۱ است که در تصاویر دیجیتال ظاهر می‌شود. این نویز با جایگزین شدن پیکسل‌های اصلی تصویر با نقاط سفید یا سیاه مشخص می‌شود [۳۷]. نویز نمک به صورت نقاط سفید با حداکثر شدت روشنایی (معمولاً ۲۵۵ در تصاویر ۸ بیتی) و نویز فلفل به صورت نقاط سیاه با حداقل شدت روشنایی (معمولاً ۰ در تصاویر ۸ بیتی) ظاهر می‌شود، درحالی‌که بقیه پیکسل‌ها بدون تغییر باقی می‌مانند.

اگر $I(x,y)$ و $I_n(x,y)$ به ترتیب شدت پیکسل در مختصات (x,y) از تصویر اصلی و شدت پیکسل نویزدار در همان مختصات باشند، فرایند نویز نمک و فلفل برای یک پیکسل (x,y) به صورت زیر است:

- با احتمال $r/2$ پیکسل به رنگ سیاه تبدیل می‌شود، $I_n(x,y)=0$
- با احتمال $r/2$ پیکسل به رنگ سفید تبدیل می‌شود، $I_n(x,y)=255$
- با احتمال $1-r$ پیکسل بدون تغییر باقی می‌ماند، $I_n(x,y)=I(x,y)$

که در اینجا $0 \leq r \leq 1$ ، نشان‌دهنده چگالی نویز است. هرچه r به ۱ نزدیک‌تر باشد، چگالی نویز بالاتر است.

حذف نویز نمک و فلفل، به‌ویژه زمانی که چگالی نویز زیاد است، یک چالش مهم در پردازش تصویر است. فیلترهای مختلفی مانند فیلتر میانه برای حذف این نوع نویز پیشنهاد شده‌اند [۲ و ۳۷].

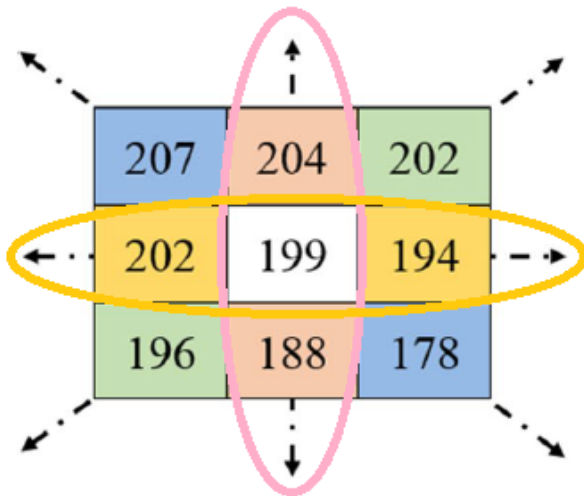
چارموتی [۳۸]، بر اساس روابط بین مقادیر پیکسل‌ها در چهار جهت (افقی، عمودی و دو قطری)، با تولید دنباله‌های مرتب‌شده از مقادیر پیکسل‌های هم‌سایه، برآوردی برای مقدار واقعی پیکسل نویزی‌شده به دست آورد. با این حال، این روش مبتنی بر تصمیم‌گیری‌های قطعی است و عدم قطعیت موجود در روابط مکانی بین پیکسل‌ها، به‌ویژه در نواحی دارای لبه یا گرادیان، را در نظر نمی‌گیرد.

از طرفی منطق فازی^۲ به عنوان یک ابزار قدرتمند برای مدیریت عدم قطعیت و اطلاعات ناقص در پردازش تصویر مطرح شده است [۳۹]. منطق فازی به دلیل قابلیت آن در مدل‌سازی استدلال انسانی و تصمیم‌گیری در شرایط مبهم، کاربرد گسترده‌ای در تشخیص نویز، طبقه‌بندی پیکسل‌ها و بهبود فرایندهای فیلترکردن یافته است. باتوجه به نقاط قوت هر یک از این رویکردها، توسعه روش‌های ترکیبی که مزایای رویکردهای مکانی و منطق فازی را در یک چارچوب یکپارچه ترکیب می‌کند، به عنوان یک مسیر تحقیقاتی امیدوارکننده مطرح شده است. هدف این روش‌ها، غلبه بر

^۲ Fuzzy Logic

1 impulse noise

از بازیابی و شباهت می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در بیشتر موارد، تغییر از یک‌رنگ (مقادیر پیکسل) به رنگ دیگر در تصویر به‌صورت هموار (تدریجی) رخ می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود که مقدار پیکسل مرکزی (CP) متعلق به مجموعه پیکسل‌های همسایه خود باشد. به‌عنوان مثال، در شکل ۱، مقدار پیکسل مرکزی «۱۹۹» بین مقادیر ۱۹۶ و ۲۰۲ (به‌صورت مورب)، ۱۷۸ و ۲۰۷ (مورب دیگر)، ۱۹۴ و ۲۰۲ (خط افقی)، و ۱۸۸ و ۲۰۴ (خط عمودی) قرار دارد. البته شکل ۱ پیکسل‌های یک پنجره را فقط در حالت قطعی نشان داده است. بخش بعدی در مورد نحوه‌ی فازی‌سازی پیکسل‌های تصویر، بحث خواهد شد.



شکل ۱: مقدار پیکسل مرکزی در میان مقادیر همسایگی در چهار جهت

فیلتر حاضر حذف نویز بر اساس ارتباط موجود بین پیکسل مرکزی و پیکسل‌های همسایه آن در تصویر عمل می‌کند. این ویژگی برای جایگزینی پیکسل تخریب‌شده با نزدیک‌ترین مقدار واقعی در چند مرحله انجام می‌شود.

به‌طور خلاصه، الگوریتم پیشنهادی از پنج گام اصلی تشکیل شده است:

- (۱) تشخیص پیکسل نویزی (۰ یا ۲۵۵)،
- (۲) تبدیل مقادیر همسایه‌ها به اعداد فازی مثلثی،
- (۳) مرتب‌سازی مقادیر در چهار جهت و انتخاب کران‌های معتبر (LV و HV)،
- (۴) محاسبه میانگین فازی و تبدیل به مقدار قطعی،
- (۵) جایگزینی مقدار جدید در تصویر خروجی.

از نظر مبانی نظری، این روش بر پایه سه رکن پردازش مکانی، منطق فازی، و توالی‌های آماری طراحی شده است. هسته‌ی مرکزی این چارچوب، ترکیب هم‌افزای پردازش مکانی با منطق فازی است. منطق فازی به دلیل توانایی در کمی‌سازی عدم قطعیت، برای مواجهه با ابهام ذاتی تصاویر نویزدار گزینه‌ای مناسب است. در این مسیر، استفاده از اعداد فازی مثلثی یک انتخاب بهینه است؛ این

$$\bar{A}(e) = \begin{cases} \frac{e-a}{c-a} & a \leq e < c \\ \frac{b-e}{b-c} & c \leq e < b \\ 0 & \text{در این غیر صورت} \end{cases} \quad (3)$$

در این مقاله، عدد فازی مثلثی به‌صورت $T(c, s_l, s_r)$ در نظر گرفته شده است که در آن $s_l = c - a$ ، پهنای چپ و $s_r = b - c$ پهنای راست عدد فازی مثلثی است.

۳ روش پیشنهادی

روش ارائه‌شده در این پژوهش، در واقع توسعه‌ای بر الگوریتم مکانی [۳۸] است که با استفاده از مفاهیم منطق فازی بهبودیافته است. در روش اصلی، تصمیم‌گیری تنها بر اساس روابط قطعی بین پیکسل‌های همسایه انجام می‌شد، درحالی‌که در روش حاضر، عدم قطعیت موجود در ساختار محلی تصویر با استفاده از اعداد فازی مثلثی مدل‌سازی شده است. هدف از این ترکیب، افزایش دقت بازسازی پیکسل‌های نویزی و حفظ بهتر جزئیات و لبه‌های تصویر است.

در سال‌های اخیر، مطالعات گسترده‌ای با بهره‌گیری از ابزارهای ریاضی - از جمله آمار، احتمال، معادلات دیفرانسیل جزئی، موجک‌ها و منطق فازی - در جهت مدل‌سازی و کاهش نویز ارائه شده‌اند. هدف اصلی، حذف مؤثر نویز و بازسازی دقیق تصویر اصلی است؛ به‌گونه‌ای که ویژگی‌هایی مانند لبه‌ها، بافت و وضوح تصویر حفظ شوند. فیلتر معرفی شده به خانواده فیلترهای مکانی تعلق دارد، به این معنی که پیکسل تخریب‌شده (نویز) با استفاده از اطلاعات همسایگی‌های مکانی آن، تخمین زده و جایگزین می‌گردد.

نقطه قوت این روش حذف نویز، بهره‌گیری از رابطه بین مقادیر پیکسل‌ها هنگام تغییر رنگ تصویر است. این تغییر معمولاً ملایم است. در نتیجه مقدار پیکسل مرکزی بین مقادیر همسایه‌ها قرار می‌گیرد و دنباله‌های مرتب طبیعی در چهار جهت (افقی، عمودی و دو مورب) ایجاد می‌شود (شکل ۱). بنابراین، این روش بر اساس این مفهوم عمل می‌کند تا با استفاده از همسایه‌های پنجره‌ای، مقدار واقعی پیکسل تخریب‌شده را استخراج و آن را تغییر دهد. در این روش، مقدار بهینه با انتخاب عددی بین بیشترین و کمترین مقدار همسایه‌ها به دست می‌آید تا نظم طبیعی پیکسل‌ها در دنباله‌های مرتب‌شده حفظ شود. این فرایند موجب حفظ ویژگی‌های ساختاری تصویر می‌شود.

بدین ترتیب، این روش به دنبال نزدیک‌ترین مقدار به مقدار اصلی پیکسل است. علاوه بر این، این رویکرد از مرحله تشخیص استفاده می‌کند تا فقط پیکسل‌های تخریب‌شده را پردازش کند و سایر پیکسل‌ها را بدون تغییر باقی بگذارد که منجر به سطح بالایی

در روشی که برای نخستین بار توسط قاسمی و همکاران [۴۱]، ارائه شده است، هر پیکسل تصویر به صورت یک عدد فازی مثلثی نامتقارن مدل می شود. در این چارچوب، مقدار رنگ مشاهده شده پیکسل به عنوان نقطه مرکزی تابع عضویت در نظر گرفته می شود که دارای درجه عضویت برابر با ۱ است. در عین حال، پهنای چپ و راست این عدد فازی که بیانگر میزان عدم قطعیت یا تغییرپذیری محلی در همسایگی آن پیکسل است، به صورت پویا و بر اساس میانگین مقادیر همسایگان محاسبه می گردد. به این ترتیب، ساختار فازی هر پیکسل، مستقیماً از زمینه تصویری اطراف آن تأثیر می پذیرد و راهی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت مکانی در سطح پیکسل فراهم می کند. برای مثال، اگر تصویر خاکستری باشد، هر پیکسل تنها یک مقدار شدت روشنایی دارد. در این صورت پنجره 3×3 از همسایگی های هر پیکسل (به جز در حاشیه تصویر) در نظر گرفته می شود و میانگین آن ها محاسبه می گردد (به عبارتی میانگین ۸ مقدار همسایگی). با در نظر گرفتن شدت روشنایی پیکسل به صورت نقطه مرکزی (c)، میانگین محاسبه شده از همسایگی ها به عنوان یک عدد فازی مثلثی نامتقارن با پهنای سمت راست (s_r) یا چپ (s_l) به صورت $T(c, s_l, s_r)$ در نظر گرفته می شود.

انتخاب تابع عضویت مثلثی برای مدل سازی فازی مقدار پیکسل، به چند دلیل صورت گرفته است. نخست، این تابع از نظر محاسباتی ساده است و امکان محاسبه سریع مرکز و پهنای فازی و انجام میانگین گیری و غیر فازی سازی را بدون محاسبات سنگین فراهم می کند. دوم، ماهیت داده تصویری - که در آن مقدار هر پیکسل حول یک مقدار مرکزی مشخص با انحراف محدود نسبت به همسایگی نوسان می کند - با شکل مثلثی (عضویت کامل در مرکز و کاهش خطی به سوی کرانه ها) سازگاری مفهومی دارد. سوم، آزمایش های مقدماتی نشان داد این تابع در مقایسه با توابع عضویت دیگر، مانند دوزنقه ای یا گاوسی، عملکرد قابل قبولی در این کاربرد ارائه می دهد بدون افزایش پیچیدگی الگوریتم. در نهایت، ماهیت یک طرفه (نامتقارن) این عدد فازی امکان می دهد در صورت وجود پیکسل های نویزی در همسایگی، اثر آن ها بر پهنای فازی محاسبه شده تا حدی محدود شود، زیرا پهنای تنها در سمتی افزایش می یابد که میانگین همسایگی از مقدار مرکزی فاصله گرفته است.

در این پژوهش، انتخاب پهنای راست و چپ با کمک میانگین شدت روشنایی همسایگی های پیکسل مرکزی و با توجه به تفاوت مقدار میانگین با مقدار آن محاسبه شده است. برای نمونه، اگر مقدار شدت روشنایی پیکسل برابر ۵۰ باشد و میانگین همسایگی ها ۶۰ باشد، شدت روشنایی پیکسل را به صورت عدد فازی $T(50, 0, 10)$ در نظر می گیریم که در آن پهنای سمت چپ صفر است (زیرا میانگین همسایگی ها بیشتر از پیکسل مورد نظر است) و پهنای سمت راست برابر ۱۰ است (که برابر با تفاوت مقدار پیکسل و میانگین همسایگی هاست).

اعداد با یک مرکز و دو کرانه، عدم قطعیت مقدار هر پیکسل را به خوبی بازنمایی می کند [۴۱].

در لایه دوم این مبانی، رویکرد پردازش جهت مند قرار دارد. تمرکز الگوریتم بر چهار جهت اصلی (افقی، عمودی و دو مورب) بر یافته های پژوهشی معتبری استوار است که اثبات می کنند این مجموعه ی جهت ها حداقل اطلاعات لازم برای استخراج ویژگی های ساختاری حیاتی تصویر، از قبیل لبه ها، شیب ها و بافت های خطی را فراهم می آورند. این رویکرد، تحلیل جامعی از همسایگی هر پیکسل ارائه می دهد و پایه ای محکم برای تصمیم گیری های بعدی ایجاد می کند.

سنگ بنای نهایی، الگوی جایگزینی مبتنی بر توالی های آماری است. این بخش بر یک اصل بنیادین در آمار فضایی تصاویر تکیه دارد: پیکسل های واقعی و غیرنویزی در یک ناحیه ی همگن محلی، از پیوستگی و همبستگی آماری قوی برخوردارند؛ بنابراین، با مرتب سازی مقادیر همسایه ها در هر جهت و استخراج الگوهای معتبر از آن ها، می توان به طور سیستماتیک به تخمینی قابل اطمینان از مقدار واقعی پیکسل تخریب شده دست یافت. این سه رکن نظری در کنار یکدیگر، نه تنها توجیه گر هر مرحله از این چارچوب هستند، بلکه نشان می دهند که روش حاضر فراتر از یک راه حل آزمایشی، بر بنیادی علمی استوار است.

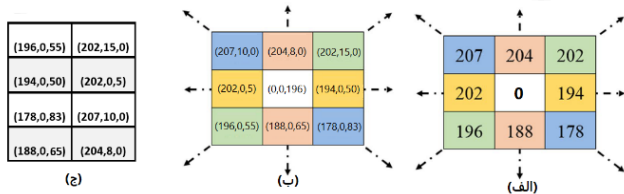
۳-۱ پیاده سازی الگوریتم پیشنهادی

استخراج مقدار جایگزین برای هر پیکسل در تصویر نویزدار، نقش کلیدی در عملکرد و موفقیت روش حذف نویز ایفا می کند. این مقادیر از همسایه های سالم گرفته می شوند تا پیکسل های تخریب شده بازسازی شوند. این فرایند به دو بخش تقسیم می شود. در بخش اول پیکسل های تصویر به مقادیر فازی تبدیل می شوند و در بخش دوم با استفاده از یک رویکرد مکانی، بهترین مقدار برای جایگزینی پیکسل تخریب شده محاسبه می شود.

۳-۱-۱ تشخیص پیکسل های نویزی و فازی سازی

یکی از نکات مهم در استفاده از این الگوریتم، اختصاص یا محاسبه ی یک عدد فازی برای رنگ هر پیکسل است. از آنجا که مقدار رنگ هر پیکسل به صورت عدد قطعی بیان می شود، می توان رویکردهای متفاوتی برای بیان فازی آن پیشنهاد داد که خود می تواند زمینه ای برای مطالعات آتی فراهم کند. برای توضیح بهتر موضوع، باید به این نکته اشاره کرد که همان طور که رنگ های رنگین کمان به سادگی از یکدیگر قابل تفکیک نیستند و به تدریج به رنگ های دیگر تبدیل می شوند، تفاوت بین رنگ یک پیکسل با رنگ همسایگی های آن نیز نمی تواند به صورت اعداد صحیح بیان شود. در حالی که در الگوریتم های موجود، برای رنگ هر پیکسل یک عدد صحیح غیر منفی در نظر گرفته می شود.

در نهایت، جدولی با دو ستون و چهار سطر (2×4) ایجاد می‌شود که ستون اول مقادیر کوچک و ستون دوم مقادیر بزرگ را بعد از مرحله فازی سازی پیکسل‌ها در خود جای می‌دهد، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: پنجره ۳ در ۳ از تصویر اصلی، (الف) پنجره انتخابی (ب) پنجره انتخابی بعد از فازی سازی پیکسل‌ها، (ج) جدول همسایگی‌های پیکسل مرکزی

مرحله ۲: در جدول 2×4 ، ستون اول شامل مقادیر کوچک هر جهت و ستون دوم شامل مقادیر بزرگ است. سپس HV^1 را به عنوان بزرگ‌ترین مقدار ستون اول و LV^2 را به عنوان کوچک‌ترین مقدار ستون دوم انتخاب می‌شود.

مرحله ۳: در این مرحله، برای محاسبه‌ی میانگین فازی از دو عدد فازی مثلثی به صورت $T(c, s_l, s_r)$ استفاده می‌شود که در آن c مرکز عدد فازی، s_l پهنای چپ، و s_r پهنای راست است. فرض کنید دو عدد فازی به صورت

$$HV = T(c_{HV}, s_{lHV}, s_{rHV}), \quad LV = T(c_{LV}, s_{lLV}, s_{rLV}) \quad (4)$$

باشند. برای محاسبه میانگین آن‌ها، ابتدا مرکز میانگین فازی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{mean} = \frac{C_{HV} + C_{LV}}{2} \quad (5)$$

سپس پهنای چپ و راست میانگین فازی نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$s_{lmean} = \frac{s_{lHV} + s_{lLV}}{2}, \quad s_{rmean} = \frac{s_{rHV} + s_{rLV}}{2} \quad (6)$$

در نهایت مقدار میانگین فازی برابر $T(c_{mean}, s_{lmean}, s_{rmean})$ است که برای تبدیل این میانگین فازی به یک مقدار قطعی (صریح)، فرمول زیر به کار می‌رود:

$$Crisp_value = \frac{(C_{mean} - s_{lmean}) + C_{mean} + (C_{mean} + s_{rmean})}{3} \quad (7)$$

این فرمول موجب می‌شود که هم مرکز و هم پهنای عدد فازی در تعیین مقدار نهایی لحاظ شوند و در نتیجه، تخمینی متوازن از رفتار فازی ورودی‌ها به دست آید.

به عنوان مثال برای پنجره شکل ۲ بیشترین مقدار (HV) و کمترین مقدار (LV) از جدول، مقادیر زیر هستند:

$$LV = T(202, 15, 0) \text{ و } HV = T(196, 0, 55)$$

در این چارچوب، پهنای چپ و راست عدد فازی تنها بیانگر میزان عدم قطعیت محلی نیستند، بلکه مستقیماً در تعیین مقدار نهایی پیکسل نویزی نیز نقش دارند. پس از انتخاب دو عدد فازی مناسب از میان جهت‌های مختلف، میانگین فازی آن‌ها محاسبه می‌شود که شامل مقدار مرکزی c ، پهنای چپ s_l و پهنای راست s_r است. سپس در مرحله غیرفازی سازی، مقدار نهایی پیکسل با استفاده از رابطه

$$P_{new} = \frac{(c - s_l) + c + (c + s_r)}{3}$$

محاسبه می‌شود.

بر اساس این رابطه، اگر میانگین شدت روشنایی همسایگی‌ها از مقدار پیکسل مرکزی بزرگ‌تر باشد، مقدار s_r افزایش یافته و در نتیجه مقدار نهایی به سمت شدت‌های روشن‌تر متمایل می‌شود. به طور مشابه، اگر میانگین همسایگی‌ها کوچک‌تر باشد، مقدار s_l افزایش یافته و مقدار بازسازی شده به سمت شدت‌های تیره‌تر هدایت می‌شود؛ بنابراین، پهنای فازی به عنوان یک مکانیزم تطبیقی، اطلاعات ساختار محلی تصویر را به فرایند بازسازی پیکسل نویزی منتقل می‌کند.

این ویژگی باعث می‌شود که الگوریتم، علاوه بر حذف مؤثر نویز ضربه‌ای، از هموارسازی بیش از حد لبه‌ها و جزئیات تصویری نیز جلوگیری نماید.

معیار کمی به کاررفته برای این تفکیک، اختلاف مطلق بین مقدار پیکسل مرکزی و میانگین مقادیر همسایگی آن است. این اختلاف به طور طبیعی در نواحی همگن کوچک، و در نواحی دارای لبه یا بافت (که پراکندگی مقادیر همسایگی بیشتر است) بزرگ‌تر است؛ از این رو، به عنوان شاخصی ضمنی از تغییرپذیری محلی - مشابه نقش واریانس یا گرادیان محلی - بدون نیاز به محاسبه مجزای این کمیت‌ها، عمل می‌کند.

۳-۱-۲ استخراج مقدار بهینه

بعد از تبدیل پیکسل‌های تصویر به مقادیر فازی، پیدا کردن مقدار جایگزین مناسب با رویکرد مکانی، در سه مرحله انجام می‌گیرد. این رویکرد توسط چارموتی و همکاران [۳۸] ارائه شده که توضیحات آن در ادامه آمده است:

مرحله ۱: در مرحله اول، هشت پیکسل همسایه موجود در پنجره نویزی 3×3 در یک جدول 2×4 مرتب می‌شوند. به این صورت که مقادیر دو پیکسل موجود در خط عمودی (۱۸۸) و (۲۰۴) را در نظر گرفته، سپس کوچک‌ترین مقدار از این دو پیکسل را در خانه اول از ردیف اول جدول قرار داده و مقدار دوم (بزرگ‌تر) در خانه دوم از همان ردیف قرار می‌گیرد. این عملیات برای پیکسل‌های باقی‌مانده در خط افقی و مورب‌ها نیز تکرار می‌شود.

^۲ Lowest Value

^۱ Highest Value

۳-۳ بازایی پیکسل‌ها

این مرحله بر اساس دو مرحله قبلی اجرا می‌شود، جایی که هر پیکسل به عنوان نویز شناسایی شده باشد با مقدار صحیح استخراج شده جایگزین می‌شود و سایر پیکسل‌ها بدون تغییر باقی می‌مانند تا تصویر مطلوب به دست آید. الگوریتم پیشنهادی در الگوریتم ۱ ارائه شده است.

۴ نتایج و تحلیل‌ها

به عنوان نمونه عملی، فرایند کاهش نویز از تصاویر سیاه و سفید بررسی می‌شود. برای این منظور، تصاویر استاندارد «بابون»^۱، «قایق»^۲ و «عکاس»^۳ انتخاب شده است. نتایج حاصل از فیلتر پیشنهادی این مقاله با فیلتر میانه، فیلتر BCFM [۳۶]، فیلتر TSVD [۲۲] و فیلتر چارموتی و همکاران [۳۷]، بر اساس معیارهای نسبت اوج سیگنال به نویز (PSNR)^۴ و شاخص سنجش شباهت ساختاری (SSIM)^۵ مقایسه می‌شود. آزمایش‌ها روی تصاویر با چگالی نویز ۱۰٪ تا ۴۰٪ انجام شده و نتایج با روش‌های موجود مقایسه گردید.

مشخصات سخت‌افزاری مورداستفاده به شرح زیر است: پردازنده مرکزی (CPU) Intel(R) Core(TM) i5-4210U با فرکانس پایه ۱/۷۰ GHz و حداکثر فرکانس ۲/۴۰ GHz، حافظه RAM 6.00 GB (۵/۸۹ GB قابل استفاده)، سیستم عامل ۶۴-bit و پیاده‌سازی در نرم‌افزار MATLAB بدون استفاده از پردازش موازی یا GPU. به منظور افزایش تکرارپذیری نتایج، مقادیر دقیق پارامترهای به کاررفته در آزمایش‌ها در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱: مقادیر دقیق پارامترهای آزمایشی الگوریتم پیشنهادی

پارامتر	مقدار
اندازه پنجره پردازش	۳×۳ پیکسل
بازه شدت روشنایی پیکسل	۰ تا ۲۵۵ (تصاویر ۸ بیتی)
سطوح چگالی نویز آزمایش شده	۱۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪ (بابون/قایق/عکاس)؛ ۵٪ تا ۶۰٪ (لنا)
نوع عدد فازی	مثلی نامتقارن $T(c, s_l, s_r)$
روش محاسبه s_l و s_r	اختلاف میانگین همسایگی ۸ پیکسلی نسبت به مقدار مرکزی
رابطه غیرفازی سازی	رابطه (۷) متن مقاله

با جاگذاری دو عدد فازی مثلی بالا در روابط (۵) و (۶)، میانگین فازی آن‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{mean} = \frac{196 + 202}{2} = 199 \quad \text{مرکز میانگین} \\ s_{l,mean} = \frac{0 + 15}{2} = 7/5 \quad \text{پهنای چپ} \\ s_{r,mean} = \frac{55 + 0}{2} = 27/5 \quad \text{پهنای راست} \end{array} \right.$$

در نتیجه، عدد فازی میانگین به صورت زیر خواهد بود:

$$Mean - fuzzy = T(199, 7/5, 27/5)$$

با جاگذاری مقادیر به دست آمده در رابطه (۷)، این عدد فازی به یک مقدار صریح تبدیل می‌شود که برابر است با:

$$Crisp - value = [(199 - 7/5) + 199 + (199 + 27/5)]/3 \approx 205/67$$

با گرد کردن، مقدار نهایی برابر ۲۰۶ است.

۳-۲ تشخیص نویز

کارایی فیلتر پیشنهادی به دو مرحله حیاتی وابسته است که یکی از آنها مرحله تشخیص نویز است. هدف این مرحله محدود کردن عملیات پردازش تنها به پیکسل‌های تخریب شده است. در این بخش نحوه تمایز بین پیکسل‌های تخریب شده و پیکسل‌های سالم شرح داده می‌شود.

مقدار فعلی پیکسل مورد پردازش (CP) با مقادیر '۰' (نویز نمکی) و '۲۵۵' (نویز فلفلی) مقایسه می‌شود. این مقایسه بر اساس رابطه (۸) انجام می‌شود.

در صورتی که رابطه (۸) برقرار باشد، پیکسل مرکزی مورد پردازش به عنوان نویز در نظر گرفته شده و با مقدار جایگزین تعویض می‌شود. در غیر این صورت، این پیکسل مرکزی سالم بوده و مقدار آن بدون تغییر باقی می‌ماند.

$$CP = \{0 \text{ or } 255\}$$

(۸)

تشخیص نویز در اینجا ساده و بدون پیچیدگی محاسباتی است و اطمینان حاصل می‌کند که تمام پیکسل‌های تخریب شده (نویز) شناسایی می‌شوند.

^۴ Peak signal to noise ratio

^۵ Structural similarity index

^۱ Baboon

^۲ Boat

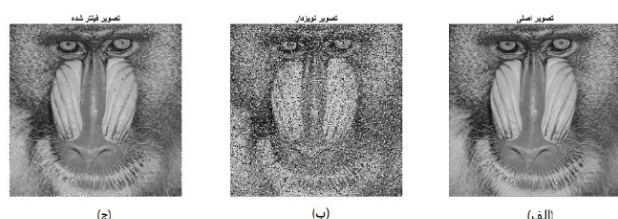
^۳ Cameraman

۰/۴۳ ثانیه به مراتب کمتر از روش های TSVD (۱/۸۵ ثانیه) و BCFM (۲/۱۵ ثانیه) است.

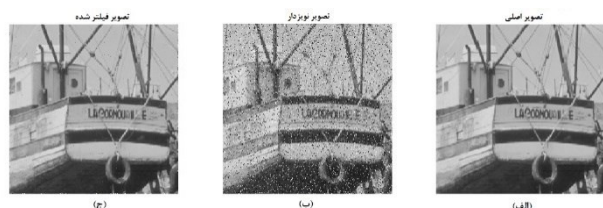
با افزایش درصد نویز به ۲۰٪، اگرچه مقادیر PSNR و SSIM برای تمامی روش ها کاهش یافته است، اما فیلتر پیشنهادی همچنان بهترین نتایج را با PSNR برابر با ۲۵/۸۷ دسی بل و SSIM برابر با ۰/۸۴۵۷ ارائه کرده است. در این سطح نویز، زمان اجرای آن ۰/۵۵ ثانیه است که در مقایسه با روش چارموتی (۰/۰۶ ثانیه) بیشتر است، اما در مقابل روش های BCFM (۳/۴۵ ثانیه) و TSVD (۱/۹۵ ثانیه) برتری محسوسی دارد.

در شرایط نویز شدید ۴۰٪، فیلتر پیشنهادی با کسب PSNR برابر با ۲۰/۰۲ دسی بل و SSIM برابر با ۰/۵۴۱۳، پایداری و مقاومت بالای خود را در برابر نویزهای شدید به خوبی نشان داده است. اگرچه زمان اجرای ساختار پیشنهادی در این سطح نویز به ۰/۸۲ ثانیه افزایش یافته است، اما همچنان به مراتب کمتر از روش BCFM (۶/۴۳ ثانیه) و TSVD (۲/۱۰ ثانیه) است. روش چارموتی با زمان اجرای ۰/۰۸ ثانیه سریع ترین است، اما کیفیت ضعیف تری (۱۸/۸۵ و ۰/۴۷۹۱) به ترتیب برای PSNR و SSIM) نسبت به الگوریتم حاضر ارائه می دهد. این نتایج نشان می دهند که رویکرد حاضر با وجود افزایش هزینه محاسباتی نسبت به روش چارموتی، بهبود قابل توجهی در کیفیت بازسازی و حفظ ساختار تصویر ارائه می دهد.

از آنجاکه زمان اجرای این الگوریتم عمدتاً به ابعاد تصویر بستگی دارد و نه به محتوای پیکسلی آن، نتایج زمان اجرا تنها برای تصویر بابون (به عنوان نماینده تصاویر هم اندازه) گزارش شده است؛ برای تصاویر قایق و عکاس که ابعاد مشابهی دارند، اختلاف معناداری در زمان اجرا مشاهده نشد.



شکل ۳: عملکرد فیلتر پیشنهادی روی تصویر بابون، (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر نویزدار، (ج) تصویر فیلتر شده



شکل ۴: عملکرد فیلتر پیشنهادی روی تصویر قایق (الف) تصویر اصلی (ب) تصویر نویزدار (ج) تصویر فیلتر شده

شکل های ۳، ۴ و ۵ خروجی تصویر اصلی، نویزدار و تصویر فیلتر شده به روش پیشنهادی را نشان می دهند. برای مقایسه کارایی، از معیارهای PSNR و SSIM برای چگالی های مختلف نویز استفاده شده است. نتایج در جدول های ۲ تا ۴ گزارش شده است.

الگوریتم ۱: حذف نویز نمک و فلفل با رویکرد ترکیبی فازی - مکانی

ورودی: تصویر نویزی A

خروجی: تصویر بازسازی شده denoised_image

۱ گام ۱: آماده سازی اولیه

۲ دریافت ابعاد تصویر

۳ گام ۲: پیش پردازش تصویر

۴ برای هر پیکسل (x,y)، مراحل ۵ و ۶ را انجام بده

۵ محاسبه میانگین پنجره محلی اطراف پیکسل

۶ مقداردهی A(x,y) به میانگین گرد شده

۷ گام ۳: تعیین پهنای فازی: در مناطق یکنواخت، پهنای فازی کوچک تر و در لبه ها و بافت ها، پهنای فازی بزرگ تر

۸ Sr: پهنای راست

۹ SI: پهنای چپ

۱۰ گام ۴: حذف نویز از پیکسل های آلوده

۱۱ ساخت کپی از A بنام denoised_image

۱۲ برای هر پیکسل (i,j)، مرحله ۱۳ را انجام بده

۱۳ اگر ۰ یا ۲۵۵ = A(x,y) آنگاه مراحل ۱۴ تا ۲۰ را انجام بده

۱۴ استخراج مقادیر همسایگی

۱۵ تشکیل بردارهای SI و Sr

۱۶ یافتن بیشینه و کمینه مراکز فازی

۱۷ محاسبه میانگین های فازی و مقدار نهایی

۱۸ محاسبه crisp-value

۱۹ محدود کردن crisp-value در بازه ۰ تا ۲۵۵

۲۰ جایگزین کردن مقدار جدید در (i,j)

۲۱ گام ۵: تولید خروجی

۲۲ بازگرداندن denoised_image

جدول ۲ به مقایسه عملکرد فیلترهای مختلف کاهش نویز برای تصویر «بابون» در سطوح مختلف نویز فلفل و نمک (۱۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪) می پردازد. برای ارزیابی کیفیت تصاویر بازسازی شده از دو معیار PSNR و SSIM و برای ارزیابی کارایی محاسباتی از معیار زمان اجرا (بر حسب ثانیه) استفاده شده است.

همان طور که مشاهده می شود، فیلتر پیشنهادی در اکثر شرایط، به ویژه در نویزهای متوسط و بالا، رفتار بهتری داشته است. به عنوان نمونه، در سطح نویز ۱۰٪، این فیلتر موفق به کسب PSNR برابر با ۲۹/۴۶ دسی بل و SSIM برابر با ۰/۹۳۸۵ شده است. اگرچه مقدار PSNR چارچوب پیشنهادی در این سطح از نویز نسبت به روش های TSVD (۲۹/۴۵) و چارموتی (۲۹/۵۷) اختلاف ناچیزی دارد، اما مقدار SSIM آن (۰/۹۳۸۵) در مقایسه با روش چارموتی (۰/۹۴۳۰) قابل قبول است. همچنین، زمان اجرای آن با

شکل ۵: عملکرد فیلتر پیشنهادی روی تصویر عکاس الف) تصویر اصلی (ب) تصویر نویزدار ج) تصویر فیلترشده



جدول ۲: مقایسه عملکرد فیلترهای کاهش نویز فلفل و نمک برای تصویر بابون

درصد نویز	معیار ارزیابی	فیلتر میانه	فیلتر BCFM	فیلتر TSVD	فیلتر چارموتی	فیلتر پیشنهادی
۱۰٪	PSNR	۲۲/۲۷	۲۸/۳۰	۲۹/۴۵	۲۹/۵۷	۲۹/۴۶
۱۰٪	SSIM	۰/۸۹۹۵	۰/۹۲۴۳	۰/۹۴۲۷	۰/۹۴۳۰	۰/۹۳۸۵
۱۰٪	Time(S)	۰/۲۸	۲/۱۵	۱/۸۵	۰/۰۴	۰/۴۳
۲۰٪	PSNR	۲۲/۳۴	۲۴/۳۲	۲۵/۴۵	۲۵/۴۸	۲۵/۸۷
۲۰٪	SSIM	۰/۷۷۲۸	۰/۸۲۹۷	۰/۸۳۰۵	۰/۸۳۳۷	۰/۸۴۵۷
۲۰٪	Time	۰/۲۹	۳/۴۵	۱/۹۵	۰/۰۶	۰/۵۵
۴۰٪	PSNR	۱۶/۳۵	۱۸/۴۷	۱۸/۲۵	۱۸/۸۵	۲۰/۰۲
۴۰٪	SSIM	۰/۴۳۹۵	۰/۴۷۳۱	۰/۴۶۸۵	۰/۴۷۹۱	۰/۵۴۱۳
۴۰٪	Time	۰/۳۰	۶/۴۳	۲/۱۰	۰/۰۸	۰/۸۲

جدول ۳: مقایسه عملکرد فیلترهای کاهش نویز فلفل و نمک برای تصویر قایق

درصد نویز	معیار ارزیابی	فیلتر میانه	فیلتر BCFM	فیلتر TSVD	فیلتر چارموتی	فیلتر پیشنهادی
۱۰٪	PSNR	۳۲/۲۱	۳۶/۳۱	۳۸/۴۳	۳۸/۶۶	۳۸/۹۹
۱۰٪	SSIM	۰/۹۴۲۶	۰/۹۷۱۴	۰/۹۸۳۹	۰/۹۸۴۷	۰/۹۸۶۶
۲۰٪	PSNR	۳۲/۲۳	۳۲/۸۴	۳۴/۵۵	۳۴/۷۳	۳۴/۷۹
۲۰٪	SSIM	۰/۹۳۳۰	۰/۹۴۸۵	۰/۹۶۳۳	۰/۹۶۵۱	۰/۹۶۸۹
۴۰٪	PSNR	۲۸/۶۸	۳۰/۰۲	۲۹/۷۶	۳۰/۱۷	۳۲/۶۲
۴۰٪	SSIM	۰/۸۶۸۳	۰/۸۹۹۷	۰/۸۹۹۹	۰/۹۰۹۷	۰/۹۴۳۲

جدول ۴: مقایسه عملکرد فیلترهای کاهش نویز فلفل و نمک برای تصویر عکاس

درصد نویز	معیار ارزیابی	فیلتر میانه	فیلتر BCFM	فیلتر TSVD	فیلتر چارموتی	فیلتر پیشنهادی
۱۰٪	PSNR	۲۸/۸۷	۲۹/۳۱	۳۱/۱۳	۳۱/۰۴	۳۰/۴۵
۱۰٪	SSIM	۰/۹۱۵۰	۰/۹۲۳۸	۰/۹۳۸۸	۰/۹۳۶۸	۰/۹۳۳۵
۲۰٪	PSNR	۲۴/۷۰	۲۵/۱۴	۲۵/۹۱	۲۵/۸۳	۲۶/۲۶
۲۰٪	SSIM	۰/۷۸۸۳	۰/۷۹۰۳	۰/۷۹۱۶	۰/۷۹۱۲	۰/۸۰۴۹
۴۰٪	PSNR	۱۷/۳۱	۱۹/۱۳	۱۹/۰۲	۱۹/۱۶	۲۰/۳۱
۴۰٪	SSIM	۰/۳۹۰۵	۰/۴۰۲۱	۰/۴۰۱۱	۰/۴۰۲۹	۰/۴۶۷۵

لحاظ هر دو معیار PSNR و SSIM برتری پیدا می‌کند. در نویز بالاتر تا ۴۰٪ نویز، فیلتر پیشنهادی به‌خوبی توانسته است نسبت به سایر روش‌ها، به‌ویژه در معیار SSIM، اطلاعات ساختاری تصویر را حفظ کند و کیفیت بهتری را ارائه دهد. به‌طور کلی، این فیلتر در تمامی شرایط عملکرد رقابتی یا بهتری نسبت به سایر فیلترها داشته و در شرایط نویز زیاد توانایی بیشتری در بازیابی تصویر نشان می‌دهد.

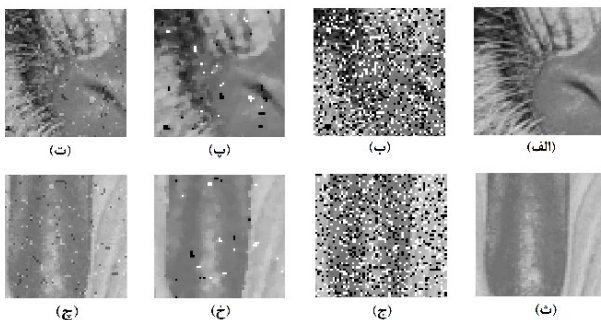
در جدول‌های ۳ و ۴ نیز عملکرد فیلترهای مختلف کاهش نویز فلفل و نمک بر روی تصویر «بابون» و «عکاس» با استفاده از دو معیار PSNR و SSIM در سه سطح نویز ۱۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪ مقایسه شده است. در درصد نویز ۱۰٪، تمام فیلترها کارایی نسبتاً خوبی دارند، با این حال فیلترهای TSVD، چارموتی و پیشنهادی نتایج بهتری را نسبت به سایر فیلترها نشان می‌دهند. در درصد نویز ۲۰٪، فیلتر پیشنهادی نسبت به بقیه فیلترها از جمله فیلتر چارموتی از

مبتنی بر تجزیه ماتریسی مانند TSVD برای هر بلوک از تصویر، عملیات سنگین جبرخطی (مانند محاسبه مقادیر منفرد و ضرب ماتریس) را انجام می‌دهند. این فرایند زمان اجرای بالایی دارد؛ برای نمونه در نویز ۴۰٪ تصویر بابون، روش TSVD حدود ۲/۱۰ ثانیه پردازش زمان می‌برد (جدول ۲)، درحالی‌که روش پیشنهادی با ۰/۸۲ ثانیه به مراتب سریع‌تر است. همچنین روش‌های پیشرفته‌تری مانند چارموتی و همکاران که پیچیدگی مشابهی با این روش دارد؛ ولی دقت کمتری ارائه می‌دهد.

شایان ذکر است که عملکرد عددی فیلتر پیشنهادی، همانند سایر روش‌های مبتنی بر پردازش مکانی، تا حدی به ویژگی‌های بافتی تصویر ورودی وابسته است. برای نمونه، در تصویر «قایق» که دارای نواحی همگن وسیع‌تری است، مقادیر PSNR به‌طور محسوسی بالاتر از تصاویر «بابون» و «عکاس» است که بافت ریزتر و جزئیات بیشتری دارند. این وابستگی به بافت، محدودیت بالقوه‌ای است که عموماً در روش‌های مبتنی بر همسایگی مکانی مشاهده می‌شود و می‌تواند در مطالعات آینده، با بهره‌گیری از اندازه پنجره متغیر یا وزن‌دهی تطبیقی بر اساس بافت محلی، بررسی شود.

۴-۱ تحلیل بصری و کیفی نتایج

برای ارزیابی عینی توانایی روش‌های مختلف در حفظ ویژگی‌های ساختاری تصویر، تحلیل بصری با بزرگ‌نمایی بالا از نواحی حساس تصویر بابون انجام شد. شکل ۷ نتایج این تحلیل را در دو ناحیه کلیدی نشان می‌دهد:

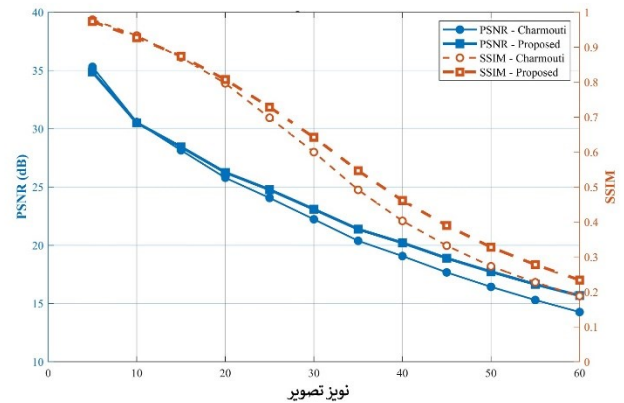


شکل ۷: تحلیل بصری عملکرد روش‌ها در حفظ بافت و لبه‌ها - بزرگ‌نمایی ۳۰۰٪ از تصویر بابون

ناحیه اول - حفظ بافت‌های ریز (تصاویر الف تا ت، سطر اول):

تصویر (الف) نمای بزرگ‌نمایی شده‌ای از بافت موهای صورت بابون در تصویر اصلی است. تصویر (ب) همان ناحیه پس از اعمال نویز نمک و فلفل با چگالی ۳۰٪ را نمایش می‌دهد. تصویر (پ) خروجی فیلتر میانه استاندارد را نشان می‌دهد که اگرچه نویز را کاهش داده، اما منجر به تخریب قابل‌توجه بافت و ایجاد اثر هموارسازی شدید شده است. در مقابل، تصویر (ت) حاصل از

به‌منظور ارزیابی عملکرد فیلتر پیشنهادی و نمایش توانایی آن در سطوح مختلف نویز، رفتار دو معیار PSNR و SSIM برای تصویر لونا در سطوح نویز ۵ تا ۶۰ درصد بررسی گردید. نتایج این بررسی در شکل ۶ ارائه شده و با عملکرد فیلتر چارموتی مقایسه شده است.



شکل ۶: مقایسه رفتار PSNR و SSIM برای دو فیلتر پیشنهادی و چارموتی

با بررسی شکل ۶ حاصل از ارزیابی دو فیلتر، مشخص می‌شود که در سطوح نویز پایین، عملکرد فیلتر پیشنهادی و فیلتر چارموتی نسبتاً مشابه است. اما با افزایش سطح نویز، فیلتر پیشنهادی نتایج بهتری ارائه می‌دهد. این روند نشان می‌دهد که فیلتر پیشنهادی در حفظ کیفیت تصویر در شرایط نویز بالا، کارآمدتر بوده و با افزایش نویز، عملکرد آن در هر دو معیار PSNR و SSIM افزایش می‌یابد، درحالی‌که عملکرد فیلتر چارموتی کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، فیلتر پیشنهادی با افزایش نویز، توانایی بیشتری در بازیابی و حفظ اطلاعات تصویر دارد.

برای ارزیابی کارایی عملی الگوریتم پیشنهادی، پیچیدگی محاسباتی آن به صورت نظری تحلیل و اندازه‌گیری شده است. از آنجایی‌که این الگوریتم بر پایه پردازش موضعی پنجره‌ای با ابعاد ثابت (3×3) عمل می‌کند و در آن برای هر پیکسل، عملیات مرتب‌سازی و انتخاب در چهار جهت انجام می‌شود، پیچیدگی محاسباتی آن به ازای یک تصویر با N پیکسل، از مرتبه $O(N)$ است. این در حالی است که روش‌های مقایسه‌شده از نظر پیچیدگی محاسباتی اغلب سنگین‌تر هستند. فیلتر میانه استاندارد اگرچه ساده است، اما در پیاده‌سازی پایه نیازمند مرتب‌سازی مقادیر درون هر پنجره بوده که هزینه محاسباتی قابل‌توجهی دارد. روش BCFM از فرایند بوت‌استرپ استفاده می‌کند که در آن برای هر پیکسل، نمونه‌گیری تصادفی با جاگذاری از همسایه‌ها هزاران بار تکرار می‌شود. این تکرارهای متعدد، حجم محاسبات را به شدت افزایش داده و زمان اجرا را بالا می‌برد. برای نمونه در نویز ۴۰٪ تصویر بابون، زمان اجرای BCFM حدود ۶/۴۳ ثانیه است. روش‌های

محلی هر پنجره را فراهم می‌آورد. برتری کیفی مشاهده‌شده در این تحلیل، مؤید و تکمیل‌کننده برتری کمی گزارش‌شده در معیارهای PSNR و SSIM است و نشان می‌دهد این روش نه تنها نویز را کاهش می‌دهد، بلکه یکپارچگی ساختاری تصویر را به طور برجسته‌ای حفظ می‌نماید.

جدول ۵ به منظور شفاف‌سازی هزینه-فایده اعمال روش پیشنهادی در مقایسه با روش چارموتی و همکاران [۳۷] ارائه شده است. لازم به توضیح است که اگرچه هر دو روش بر پایه پردازش در چهار جهت (افقی، عمودی و دو قطر) عمل می‌کنند، اما تفاوت اساسی در رویه‌ی تصمیم‌گیری نهفته است: روش چارموتی صرفاً یک انتخاب جهت‌یافته ساده انجام می‌دهد، درحالی‌که این روش علاوه بر ساختار چهار جهتی، از تبدیل خاص و محاسبات فازی برای وزن‌دهی هوشمندانه به اطلاعات هر جهت بهره می‌برد. همین بخش اضافی است که هم موجب ارتقای کیفیت می‌شود و هم هزینه محاسباتی بیشتری را تحمیل می‌کند.

روش حاضر، ضمن حذف مؤثر نویز، ساختار بافت موها را به خوبی حفظ کرده و از تخریب جزئیات ریز جلوگیری کرده است.

ناحیه دوم - حفظ لبه‌های تیز (تصاویر ث تا ج، سطر دوم): تصویر (ث) بزرگ‌نمایی از ناحیه‌ای غنی از لبه در اطراف بینی و دهان بایون است. تصویر (ج) حالت نویزدار این ناحیه را نشان می‌دهد. تصویر (خ) خروجی فیلتر میانه را نمایش می‌دهد که موجب تارشدگی^۱ لبه‌ها و از بین رفتن مرزهای واضح شده است. در مقایسه با سایر تصاویر، تصویر (چ) که نتیجه اعمال فیلتر پیشنهادی است، تیزی و وضوح لبه‌ها را به طور چشمگیری حفظ کرده و مرزهای ساختاری را بدون اعوجاج آشکار ساخته است.

این مشاهدات بصری به وضوح نشان می‌دهند که رویکرد پیشنهادی، برخلاف فیلتر میانه که رویکردی یکنواخت دارد، توانایی تشخیص و تمایز بین نواحی هموار، بافت‌دار و لبه‌دار را داراست. این ویژگی مستقیماً ناشی از چارچوب ترکیبی فازی- مکانی الگوریتم است که امکان پردازش دقیق‌تر و متناسب با محتوای

جدول ۵: مقایسه جامع الگوریتم پیشنهادی و الگوریتم چارموتی

معیار مقایسه	الگوریتم چارموتی	الگوریتم پیشنهادی	هزینه بهبود (روش پیشنهادی نسبت به چارموتی)
پیچیدگی زمانی نظری	$O(N)$	$O(N)$	مشابه
زمان اجرا (نویز ۱۰٪)	۰/۰۴ ثانیه	۰/۴۳ ثانیه	حدود ۱۰/۸ برابر کندتر
زمان اجرا (نویز ۲۰٪)	۰/۰۶ ثانیه	۰/۵۵ ثانیه	حدود ۹/۲ برابر کندتر
زمان اجرا (نویز ۴۰٪)	۰/۰۸ ثانیه	۰/۸۲ ثانیه	حدود ۱۰/۳ برابر کندتر
حافظه اضافی مورد نیاز	تا ۲ ماتریس کمکی ^۱	ماتریس کمکی ۴	تا ۴ برابر حافظه بیشتر (در عمل ۲ ناچیز)
کیفیت PSNR در نویز ۴۰٪ - تصویر بایون	۱۸/۸۵ dB	۲۰/۰۲ dB	بهبود ۱/۱۷ dB
کیفیت SSIM در نویز ۴۰٪ - تصویر بایون	۰/۴۷۹۱	۰/۵۴۱۳	بهبود (حدود ۱۳٪) ۰/۰۶۲۲

^۱ blurring

پیچیدگی زمانی نظری: هر دو روش از مرتبه $O(N)$ هستند، زیرا برای هر پیکسل تعداد ثابتی عملیات انجام می‌شود. با این حال، ثابت محاسباتی در این روش به دلیل وجود تبدیل و محاسبات فازی به مراتب بزرگ‌تر است.

هزینه زمانی عملی: روش پیشنهادی در سطوح مختلف نویز (۱۰٪، ۲۰٪ و ۴۰٪) به‌طور متوسط حدود ۱۰ برابر کندتر از روش چارموتی عمل می‌کند. این اختلاف مستقیماً ناشی از بار محاسباتی اضافی ناشی از تبدیل و فازی‌سازی است. با این وجود، از نظر مطلق و برای اغلب کاربردهای غیر بلادرنگ (مانند بازیابی تصاویر تاریخی، پیش‌پردازش در سیستم‌های بینایی ماشین و تصویربرداری پزشکی)، زمان کمتر از ۱ ثانیه (۰/۴۳ تا ۰/۸۲ ثانیه) کاملاً قابل قبول و کارآمد محسوب می‌شود.

هزینه حافظه: روش پیشنهادی به دلیل ذخیره‌سازی خروجی تبدیل و توابع عضویت فازی برای هر جهت، به ۴ ماتریس کمکی نیاز دارد، در حالی‌که روش چارموتی با ۱ تا ۲ ماتریس کار می‌کند؛ بنابراین مصرف حافظه روش پیشنهادی ۲ تا ۴ برابر بیشتر است. برای تصاویر با ابعاد متداول (۵۱۲×۵۱۲ پیکسل)، این تفاوت معادل چند مگابایت حافظه اضافی است که در سیستم‌های امروزی ناچیز است.

دستآورد کیفی (بهبود): در مقابل این هزینه‌های زمانی و حافظه، روش پیشنهادی بهبود معناداری در کیفیت بازسازی تصویر ارائه می‌دهد. برای نمونه در شرایط نویز شدید ۴۰٪ بر روی تصویر بابون، رویکرد پیشنهادی PSNR را به میزان ۱/۱۷ دسی‌بل و SSIM را به میزان ۰/۰۶۲۲ (یعنی حدود ۱۳٪) نسبت به روش چارموتی افزایش داده است. دلیل این بهبود مستقیماً به تبدیل و محاسبات فازی بازمی‌گردد که امکان تشخیص دقیق‌تر پیکسل‌های آلوده از سالم و همچنین حفظ بهتر لبه‌ها و بافت‌های ظریف را فراهم می‌سازد. در نویزهای بالاتر (مانند ۵۰٪ و ۶۰٪ که در نمودارها نشان داده شده)، این اختلاف کیفی آشکارتر نیز می‌شود.

در مجموع، این ترکیب با افزودن تبدیل و محاسبات فازی به ساختار چهار جهتی مشابه روش چارموتی، هزینه زمانی بیشتری را متحمل می‌شود. با این حال، زمان اجرای آن همچنان کمتر از یک ثانیه باقی می‌ماند و هزینه حافظه اضافی نیز ناچیز است. در مقابل، این روش بهبود کیفی محسوس و پایداری بالاتری در برابر نویزهای شدید ارائه می‌دهد؛ بنابراین، انتخاب بین دو روش به اولویت کاربرد بستگی دارد: اگر سرعت فوق‌العاده اولویت اصلی باشد، روش چارموتی (با ساختار ساده‌تر و بدون محاسبات فازی) گزینه مناسب‌تری است؛ اما اگر کیفیت بازیابی و حفظ جزئیات در اولویت باشد، روش پیشنهادی با بهره‌گیری از تبدیل و فازی‌سازی، برتری آشکاری را نشان می‌دهد.

۵ نتیجه‌گیری

این مطالعه باهدف حل مشکل نویز نمک و فلفل در تصاویر دیجیتال انجام شده است. در این راستا، روش مکانی معرفی شده در [۳۸] با بهره‌گیری از منطق فازی توسعه داده شده که مبتنی بر بررسی مقادیر پیکسل‌ها و روابط آن‌ها در یک پنجره محلی است. برخلاف بسیاری از رویکردهای فازی رایج، در این کار از اعداد فازی متقارن یا پارامترهای ثابت استفاده نشده است. در عوض، هر پیکسل به‌صورت یک عدد فازی مثلی نامتقارن مدل‌سازی می‌شود که پهنای آن به‌صورت پویا و بر اساس اطلاعات محلی تعیین می‌گردند.

این رویکرد، ماهیت تصویر-تطبیقی^۱ دارد و امکان تشخیص هوشمند پیکسل‌های نویزی را فراهم می‌آورد؛ در مناطق یکنواخت، پهنای فازی کوچک‌تری اختصاص می‌یابد و حساسیت به انحرافات بالا می‌رود، در حالی‌که در مناطق پیچیده (مانند لبه‌ها یا بافت‌های غنی)، پهنای بزرگ‌تری در نظر گرفته می‌شود تا از محوشدگی ساختارهای معنادار جلوگیری شود.

در گام بعدی، تصمیم‌گیری برای جایگزینی پیکسل تخریب‌شده با بهره‌گیری از استدلال فازی مبتنی بر همسایگی‌های وزن‌دار انجام می‌پذیرد. به‌طوری‌که انتخاب مقدار جایگزین در بین مقادیر حداکثر و حداقل همسایه‌ها است تا در توالی مرتب شده، ترتیب و ساختار تصویر نیز حفظ شود.

در مجموع نوآوری این کار، ادغام نمایش فازی پویا (نامتقارن و تصویر-تطبیقی) با تصمیم‌گیری مکانی وزن‌دار است.

در این پژوهش، کارایی فیلتر پیشنهادی بر روی تصاویر استاندارد سیاه‌وسفید «قایق»، «بابون» و «عکاس» ارزیابی و با روش‌های موجود مقایسه شده است. نتایج عددی و بصری نشان می‌دهد که روش حاضر در حذف نویز، حفظ ویژگی‌های ساختاری تصویر، و شاخص‌های PSNR و SSIM نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری دارد. ارزیابی حفظ جزئیات و لبه‌های تصویر نیز عمده‌تاً بر پایه‌ی همین دو معیار عددی (به‌ویژه SSIM که نسبت به تغییرات ساختاری حساس است) و تحلیل بصری تصاویر بزرگ‌نمایی‌شده صورت گرفته است. به‌کارگیری معیارهای اختصاصی‌تر حفظ لبه یا ساختار می‌تواند در مطالعات آتی به‌عنوان مکمل این ارزیابی مورد توجه قرار گیرد.

باوجود کندتر بودن نسبت به روش چارموتی (حدود ۱۰ برابر)، این روش همچنان برای تصاویر ۵۱۲×۵۱۲ در کمتر از یک

^۱ Image-adaptive

- [6] Li, X., *Image restoration: Fundamentals and advances*, CRC Press, Boca Raton, 2012.
- [7] Abdurrazzaq, A., Mohd, I., Junoh, A. K., Yahya, Z., *Modified tropical algebra based median filter for removing salt and pepper noise in digital image*, IET Image Process. Vol. 13, no. 14, pp. 2790-795, 2019.
- [8] Boyat, A. K., Joshi, B. K., *A review paper: noise models in digital image processing*, arXiv:1505.03489, 2015.
- [9] Liu, L., Chen, L., Chen, C. L. P., Tang, Y. Y., Pun, C. M., *Weighted joint sparse representation for removing mixed noise in image*, IEEE T. Cybernetics, vol. 47, no. 3, pp. 600-611, 2017.
- [10] Charmouti, B., Junoh, A. K., Mashor, M. Y., Ghazali, N., Ab Wahab, M., Muhammad, W. Z. A. W., Yahya, Z., Beroual, A., *An overview of the fundamental approaches that yield several image denoising techniques*, Telkomnika, vol. 17, no. 6, pp. 2959-296, 2019.
- [11] Lindenbaum, M., Fischer, M., Bruckstein, A., *On Gabor's contribution to image enhancement*, Pattern Recogn. Vol. 27, no. 1, pp. 1-8, 1994.
- [12] Rudin, L. I., Osher, S., Fatemi, E., *Nonlinear total variation based noise removal algorithms*, Physica D: nonlinear phenomena, vol. 60, no. 1-4, pp. 259-268, 1992.
- [13] Tomasi, C., Manduchi, R., *Bilateral filtering for gray and color images*, In: ICCV, 1998.
- [14] He, K., Sun, J., *Fast guided filtering*, arXiv:1505.00996, 2013.
- [15] He, W., Yi, C., Li, Y., Xiao, H., *Research on mechanical fault diagnosis scheme based on improved wavelet total variation denoising*, Shock Vib., pp.1-11, 2016.
- [16] Buades, A., Coll, A., Morel, J.-M., *A review of image denoising algorithms, with a new one*, Multiscale modeling and simulation, vol. 4, no. 2, pp. 490-530, 2005.
- [17] Buades, A., Coll, A., Morel, J.-M., *A non-local algorithm for image denoising*, IEEE Comput. Soc. Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit., 2005.
- [18] Wang, H., Wang, Y., Ren, W., *Image denoising using anisotropic second and fourth order diffusions based on gradient vector convolution*, Computer Science and Information Systems, vol. 9, no. 4, pp. 1493-1512, 2012.
- [19] Wang, Y., Ren, W., Wang, H., *Anisotropic second and fourth order diffusion models based on convolutional virtual electric field for image denoising*, Computers & Mathematics with Applications. Vol. 66, no. 10, pp. 1729-1742, 2013.
- [20] Toh, K. K. V., Isa, N. A. M., *Noise adaptive fuzzy switching median filter for salt-and-pepper noise reduction*, IEEE Signal Process. Vol. 17, no.3, pp. 281-284, 2010.
- ثانیه اجرا می شود که برای کاربردهای غیر بلادرنگ مناسب است. این بهبود کارایی ۱۳٪ SSIM نسبت به چارموتی، افزایش هزینه محاسباتی را قابل قبول می سازد. در تحقیقات آینده، این فیلتر می تواند با استفاده از اطلاعات موقعیتی پیکسل ها در توالی مرتب شده بهبود یابد و برای نویزهای ترکیبی نیز توسعه داده شود. لازم به ذکر است که در این رویکرد، از پنجره پردازشی 3×3 به دلیل سادگی محاسباتی، سرعت مناسب و توانایی بهتر در حفظ جزئیات و لبه های تصویر استفاده شده است. پنجره های کوچک معمولاً باعث می شوند که اطلاعات محلی تصویر با دقت بیشتری حفظ گردد و از هموارسازی بیش از حد نواحی دارای جزئیات جلوگیری شود. با این حال، استفاده از پنجره 3×3 دارای محدودیت هایی نیز هست. در تصاویر دارای بافت های پیچیده، الگوهای تکراری یا ساختارهای بزرگ مقیاس، ممکن است این پنجره اطلاعات زمینه ای کافی برای تخمین دقیق مقدار پیکسل نویزی فراهم نکند. در چنین شرایطی، استفاده از پنجره های بزرگ تر می تواند اطلاعات بیشتری از ساختار محلی تصویر در اختیار الگوریتم قرار دهد، هرچند ممکن است موجب افزایش هموارسازی و کاهش وضوح لبه ها شود.
- بنابراین، انتخاب اندازه پنجره نوعی مصالحه میان حفظ جزئیات و میزان هموارسازی ایجاد می کند. توسعه روش های تطبیقی یا چند مقیاسی برای انتخاب پویای اندازه پنجره، می تواند به عنوان یکی از مسیرهای مطالعات آینده در نظر گرفته شود. همچنین در پژوهش های آینده، ارزیابی روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده های استاندارد بزرگ تر (مانند BSDS500 یا Set12) می تواند اعتبار آماری نتایج را تقویت کرده و امکان مقایسه گسترده تری با روش های موجود فراهم آورد.
- ## مراجع
- [۱] آسلیمی ضامنجان، جواد؛ شکور، محمدحسین؛ رمانی، محسن. *طبقه بندی تصاویر بافتی نویزدار با استفاده از شبکه عصبی عمیق و الگوی دودویی محلی کامل*، نشریه ماشین بینایی و پردازش تصویر، سال نهم شماره ۲، ۱۴۰۱.
- [2] Azzeh, Jamil, Bilal Zahran, and Ziad Alqadi. *Salt and pepper noise: Effects and removal*, JOIV: International Journal on Informatics Visualization, vol. 2, no. 4, pp. 252-256, 2018.
- [3] Zhu, L., *Application of stack filter on image processing*, Appl. Mech. Mater., Trans Tech Publ, 2014.
- [4] Yaroslavsky, L. P., *Digital picture processing: an introduction*, Appl. Optics 25, 3127, 1986.
- [5] Yan, M., *Restoration of images corrupted by impulse noise and mixed Gaussian impulse noise using blind inpainting*, SIAM Journal on Imaging Sciences. vol. 6, no. 3, pp. 1227-1245, 2013.

- [35] He, W, Yi C, Li Y, Xiao H., *Research on mechanical fault diagnosis scheme based on improved wavelet total variation denoising*, Shock and Vibration, vol. 2016, no. 1, pp. 1-11, 2016.
- [36] Lv, X.-G., Song, Y.-Z., Li, F., *An efficient nonconvex regularization for wavelet frame and total variation based image restoration*, Journal of computational and applied mathematics, vol. 290, pp. 553-566, 2015.
- [37] Bandyopadhyay, A., Shubhendu B., Atanu D., and Rajib B., *A relook and renovation over state-of-art salt and pepper noise removal techniques*. IJ Image, Graphics and Signal Processing, vol. 9, pp. 61-69, 2015.
- [38] Charmouti, B., Junoh, A. K., Abdurrazzaq, A., Mashor, M. Y., *A new denoising method for removing salt & pepper noise from image*, Multimedia Tools and Applications, vol. 81, no. 3, pp. 3981-3993, 2022.
- [39] Toh, K, Isa, N. Noise Adaptive Fuzzy Switching Median Filter for Salt-and-Pepper Noise Reduction. IEEE Signal Processing Letters, vol. 17, no. 3, pp. 281-284, 2010.
- [40] Zadeh, L. A. *Fuzzy sets*, Information and Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [41] Ghasemi, R., Morillas, S., Nezakati, A., Rabiei, M., *Image Noise Reduction by Means of Bootstrapping-Based Fuzzy Numbers*, Applied Sciences, vol. 12, no. 19, p. 9445, 2022.
- [21] Esakkirajan, S., Veerakumar, T., Subramanyam, A. N., Prem Chand, C. H., *Removal of high density salt and pepper noise through modified decision based unsymmetric trimmed median filter*, IEEE Signal Process. Vol. 18, no. 5, pp. 287-290, 2011.
- [22] Erkan, U., Gokrem, L. A., *A new method based on pixel density in salt and pepper noise removal*, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, vol. 26, no. 1, pp. 162-171, 2018.
- [23] Abdurrazzaq, A., Mohd, I., Junoh, A. K., Yahya, Z., *A hybrid of tropical-singular value decomposition method for salt and pepper noise removing*, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, vol. 27, no. 3, pp. 1667-1679, 2019.
- [24] Erkan, U., Gokrem, L., Enginoglu, S., *Different applied median filter in salt and pepper noise*, Computers & Electrical Engineering, vol. 70, pp. 789-798, 2018.
- [25] Abdurrazzaq, A., Mohd, I., Junoh, A. K., Yahya, Z., *Tropical algebra based adaptive filter for noise removal in digital image*, Multimedia Tools and Applications, vol. 79, no. 27, pp. 19695-19668, 2020.
- [26] Mallat, S., *A wavelet tour of signal processing: the sparse way*, Academic Press, New York, 2008.
- [27] Demanet, L., Ying, L., *Wave atoms and sparsity of oscillatory patterns*, Applied and Computational Harmonic Analysis, vol. 23, no. 3, pp. 368-87, 2007.
- [28] Starck, J.-L., Candès, E. J., Donoho, D. L., *The curvelet transform for image denoising*, IEEE T. Image Process. Vol. 11, no. 6, pp. 670-684, 2002.
- [29] Do, M. N., Vetterli, M., *The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation*, IEEE T. Image Process, vol. 14, no. 12, pp. 2091-2106, 2005.
- [30] Donoho, D. L., *Wedgelets: Nearly minimax estimation of edges*, the Annals of Statistics, vol. 27, no. 3, pp. 859-897, 1999.
- [31] Le Pennec, E., Mallat, S., *Sparse geometric image representations with bandelets*, IEEE T. Image Process. vol. 14, no. 4, pp. 423-438, 2005.
- [32] Ding, Y., Selesnick, I. W., *Artifact-free wavelet denoising: Non-convex sparse regularization, convex optimization*, IEEE Signal Proc. Let. Vol. 22, no. 9, pp. 1364-1368, 2015.
- [33] Durand, S., Froment, J., *Reconstruction of wavelet coefficients using total variation minimization*, SIAM Journal on Scientific computing, vol. 24, no. 5, pp. 1754-1767, 2003.
- [34] Elyasi, I., Pourmina, M. A., *Reduction of speckle noise ultrasound images based on TV regularization and modified Bayes shrink techniques*, Optik, vol. 127, no. 24, pp. 11732-11744, 2016.

روشنک زمان استادیار گروه آمار دانشگاه پیام نور؛ زمینه مطالعاتی: نظریه قابلیت اعتماد، داده های طول عمر و پردازش تصویر.
در مقطع کارشناسی ارشد، زیر نظر شادروان استاد دکتر بهرام صادقیپور با مفهوم فازی آشنا شدم و از آن پس کوشیده‌ام این مفهوم را در زمینه‌های تحقیقاتی خود به کار گیرم.

رضا قاسمی نجف‌آبادی استادیار گروه آمار دانشگاه پیام نور؛ زمینه مطالعاتی: پردازش تصویر، یادگیری ماشین و منطق فازی.