روشي براي آشكارسازي لبه بر مبناي مدل محاسباتي سلول سادة كورتكس اولية بينايي

ناصر مهرشاد[۱]، محمدحسن قاسميان[۲]*

[۱] استاديارگروه الكترونيک و مخابرات، دانشكدة مهندسي، دانشگاه بيرجند، بيرجند
[۲] استاد دانشكدة مهندسي برق و كامپيوتر، دانشگاه تربيت مدرس، تهران

چكيده

سلول‌هاي سادة كورتكس اولية بينايي به قطعات لبه يا خط داراي جهت مشخص موجود در ميدان دريافتشان پاسخ شديد مي‌دهند. در اين مطالعه، با استفاده از مدل محاسباتي اين سلول‌ها، روش جديدي براي آشكارسازي لبه ارائه شده است. در اين روش، ابتدا پاسخ‌هاي مربوط به مدل محاسباتي سلول ساده در تعدادي جهت ترجيحي مختلف محاسبه مي‌شود و سپس بردار گراديان شدت روشنايي در هر نقطة تصوير با محاسبة جمع وزندار اين پاسخ‌ها به‌دست مي‌آيد. پارامترهاي مربوط به مدل محاسباتي سلول ساده به گونه‌اي تنظيم شده كه عملگر حاصل در آشكارسازي، تعيين دقيق موقعيت و پاسخ يگانه به لبة پلة آغشته به نويز سفيد گوسي به‌صورت بهينه عمل كند. مجموعة اين عوامل و ويژگي‌هاي موجود در تصاوير پزشكي سبب گرديد تا عملگر حاصل براي آشكارسازي لبه در تصاوير پزشكي مناسب باشد. به منظور ارزيابي كمي روش پيشنهادي، تصاوير ساختگي و پزشكي به همراه نقشة مرجع لبه‌هاي مربوط به اين تصاوير مورد استفاده قرار گرفت. نتايج نشان داد كه روش پيشنهادي در مقايسه با روش‌هاي مرسوم آشكارسازي لبه (نظير روش كني) از كارايي بهتري برخوردار بوده و در مقابل تغييرات پارامترهاي ورودي پايدارتر است.

واژه‌هاي كليدي: لبه؛ سلول ساده؛ كورتكس اولية بينايي؛ ميدان دريافت؛ فيلتر گابور

---

[*] **عهده‌دار مكاتبات**

نشاني: تهران، دانشگاه تربيت مدرس، دانشكده مهندسي برق و كامپيوتر، صندوق پستي ۱۴۳-۱۴۱۱۵

تلفن: ۸۲۸۸۳۳۷۳، ۰۹۱۲۱۳۲۷۸۰۹، **دورنگار:** ۸۲۸۸۴۳۲۵، **پيام نگار:** ghassemi@modares.ac.ir

۱- مقدمه

در یک تصوير مرز ميان یک شئ و زمينه و يا مرز ميان اشياء همپوشان را لبه تعريف مي‌كنند. در حالت ايده‌آل اگر فرض كنيم كه مقدار شدت روشنايي هر شئ در تصوير يكنواخت بوده و با مقادير شدت روشنايي اشياء مجاورش متفاوت باشد، آنگاه هرگونه تغيير قابل ملاحظه در مقدار شدت روشنايي را مي‌توان لبه در نظر گرفت. با اين تعريف اگر لبه‌هاي یک تصوير مشخص شوند، مكان تمام اشياء موجود در تصوير مشخص شده و خواص اساسي آنها از قبيل سطح، محيط و غيره به راحتي قابل اندازه‌گيري خواهد بود.

كارآمدترين روش‌هايي كه تاكنون براي آشكارسازي لبه[1] ارائه شده‌اند روش‌هاي توسعه يافته بر اساس بهينه‌سازي مجموعه‌اي از معيارها هستند. در اين روش‌ها ابتدا تعريف رياضي دقيقي از لبه ارائه شده و سپس معيارهايي براي عملگر مورد استفاده در آشكارسازي اين لبه در نظر گرفته شده است. از جملة اين روش‌ها مي‌توان روش كني[2]، روش شن-كاستان[3] و روش راكش[4] را نام برد [۱-۳].

در سال ۱۹۸۶، كني سه معيار خطاي آشكارسازي لبه، تعيين دقيق موقعيت لبه و پاسخ يگانه به لبه را مطرح كرد و نشان داد كه عملگر مشتق گوسي، اين معيارها را به‌طور تقريبي بهينه مي‌كند.

در سال ۱۹۹۲، شن و كاستان با در نظر گرفتن دو معيار خطاي آشكارسازي لبه و تعيين دقيق موقعيت لبه، عملگر نمايي متقارن نامحدود[5] را به‌عنوان عملگر بهينه براي آشكارسازي لبه معرفي كردند. آنها ادعا كردند كه عملگر نمايي متقارن نامحدود در مقايسه با عملگر مشتق گوسي نسبت سيگنال به نويز[6] (SNR) بهتري ايجاد نموده و موقعيت لبه را نيز دقيق‌تر مشخص مي‌كند [۴].

در محاسبة عملگر نمايي متقارن نامحدود به معيار پاسخ يگانه براي لبه اشاره نشده است بنابراين احتمال دارد عملگر فوق به لبه‌هاي مات شده و نويزي پاسخ نادرست بدهد. عملكرد اين دو روش در آشكارسازي لبه براي تصاوير واقعي به پارامترهاي ورودي وابسته است. به همين دليل نمي‌توان در مورد برتري يكي از اين روش‌ها بر ديگري نظر قطعي ارائه داد [۴].

در سال ۲۰۰۴، راكش و همكارانش با اضافه كردن یک مرحلة پردازش آماري روي اندازة گراديان شدت روشنايي تصوير، پايداري روش كني در برابر تغييرات يكي از پارامترهاي ورودي (مقدار آستانه) را افزايش دادند [۳]. با وجود اين كارهاي جديد كه در زمينة آشكارسازي لبه انجام شده، در بسياري از تحقيقات اخير در مورد ناحيه‌بندي تصوير، از روش كني براي آشكارسازي لبه‌هاي تصوير استفاده شده است [۵-۷]. همچنين، در مطالعاتي كه به مسالة آشكارسازي لبه اختصاص دارد روش كني به‌عنوان روش بهينة ارزيابي مورد استفاده قرار گرفته است [۸، ۹].

در بسياري از تحقيقات پزشكي و كاربردهاي باليني از قبيل تعيين حجم عضو يا غدة مورد مطالعه، تجسم و تحليل ساختارهاي آناتوميكي و ادغام اجزاء مختلف اطلاعات و تثبيت، يكي از مهمترين اطلاعات مورد نياز لبه‌ها هستند. در تصاوير پزشكي، آشكارسازي لبه‌ها از روي مقادير شدت روشنايي كار ساده‌اي نيست. به‌عنوان مثال، ممكن است مرزهاي عضو مات شوند (به‌دليل جابجا شدن‌هاي بيمار) يا محو گردند (به‌دليل SNR پايين دستگاه) و يا موجود نباشند (وقتي كه با اعضاء مشابه اطراف مخلوط شوند) [۱۰]. اين عوامل، آشكارسازي مرزهاي اعضاء را با مشكل مواجه مي‌كنند. با وجود اين امر، سيستم بينايي انسان قادر است تغييرات سريع و همچنين تغييرات تدريجي مقادير شدت روشنايي را به‌خوبي آشكار كند.

هدف اين مطالعه ارائة یک مدل فرضي از سيستم بينايي انسان براي آشكارسازي لبه‌هاي تصوير است. فرض‌هاي در نظر گرفته شده در اين مدلسازي به‌گونه‌اي است كه مدل حاصل براي كاربردهاي پزشكي مناسب باشد و در مقايسه با روش‌هاي آشكارسازي لبة مرسوم، مرزهاي اعضاء را با دقت بيشتري آشكار نمايد.

---

[1] Edge detection
[2] Canny
[3] Shen-Castan
[4] Rakesh
[5] Infinite symmetric exponential filter
[6] **S**ignal to **N**oise **R**atio

۲- روش‌ها

۲-۱- مدل سلول سادهٔ کورتکس اولیهٔ بینایی

در چند دههٔ اخیر تحقیقات زیادي در مورد تحلیل تصویر به‌وسیلهٔ سیستم بینایی انسان انجام شده است [۱۱-۱۴]. به‌دلیل پیچیدگي حیرت‌آور سیستم بینایي انسان، امکان ارائهٔ مدل‌هایي که به‌طور مستقیم از روي فیزیولوژي سیستم بینایي انسان اقتباس شده باشند، وجود ندارد. اما خوشبختانه این امکان وجود دارد که با الهام گرفتن از پردازش‌هاي متوالي که در سیستم بینایي انسان روي اطلاعات بینایي انجام مي‌شود و همچنین تقلید از مشاهدات آزمایش‌هاي روان‌بینایي[7]، مدل‌هایي براي جنبه‌هاي مختلف سیستم بینایي انسان پیشنهاد شوند.

حساسیت سیستم بینایي انسان به خطوط و لبه‌هاي با جهت‌هاي معین در موقعیت مشخصي از میدان دید سیستم بینایي، از جمله مواردي است که براي آن شواهد نروفیزیولوژیکي و روان‌بینایي وجود دارد. در آغاز دههٔ ۱۹۶۰ با مطالعهٔ نروفیزیولوژیکي سیستم بینایي میمون‌ها و گربه‌ها مشخص شد که بیشتر سلول‌هاي کورتکس اولیهٔ بینایي به خط یا لبهٔ داراي جهت معین در موقعیت مشخصي از میدان بینایي پاسخ مي‌دهند [۱۱]. دو نوع سلول حساس به جهت مشاهده شدند. سلول‌هایي که به جهت افزایشي یا کاهشي بودن خطها و لبه‌ها حساس بودند، سلول‌هاي ساده نامیده شدند و سلول‌هایي که از این ویژگي برخوردار نبودند، به سلول‌هاي پیچیده معروف شدند.

مدل‌هاي محاسباتي به‌کمک شبیه‌سازي عملکرد این سلول‌ها توسعه یافتند. سلول‌هاي ساده به‌وسیلهٔ فیلترهاي خطي و به‌دنبال آن یکسوسازي نیم موج مدل شدند. به‌ویژه خانواده‌اي از توابع گابور[8] دو بعدي به‌عنوان مدلي از خواص فیلترسازي خطي سلول‌هاي ساده پیشنهاد شدند. این امر باعث شد که در کاربردهاي مختلف بینایي کامپیوتر از قبیل آنالیز بافت و آشکارسازي لبه، توابع گابور به‌طور وسیعي استفاده شوند.

فیلتر گابور یک فیلتر خطي و محلي است. هستهٔ کانولوشن فیلتر گابور حاصل‌ضرب یک تابع کسینوسي و گوسین است. این فیلتر به‌وسیلهٔ جهت و فرکانس مکاني ترجیحي مشخص مي‌شود. به بیان تقریبي یک فیلتر گابور دو بعدي به‌عنوان یک فیلتر میان‌گذر محلي با خواص مکان‌یابي توأم در حوزهٔ مکان و در حوزهٔ فرکانس مکاني عمل مي‌کند [۱۶,۱۵].

رابطهٔ ۱ پاسخ سلول سادهٔ حساس به جهت ترجیحي θ_k و فرکانس مکاني $1/\lambda$ به یک تصویر داراي تابع توزیع شدت روشنایي $i(x,y)$ را نشان مي‌دهد [۸]:

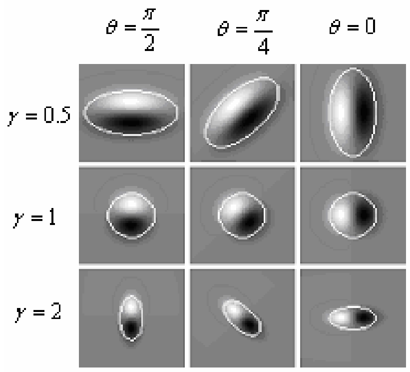
$$S_{\sigma,\lambda,\theta_k,\varphi}(x,y)=h_{\sigma,\lambda,\theta_k,\varphi}(x,y)*i(x,y)$$

$$h_{\sigma,\lambda,\theta_k,\varphi}(x,y)=\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\tilde{x}+\varphi\right)e^{-\frac{\tilde{x}^2+\gamma^2\tilde{y}^2}{2\sigma^2}}$$

$$\begin{bmatrix}\tilde{x}\\ \tilde{y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\theta_k & \sin\theta_k\\ -\sin\theta_k & \cos\theta_k\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ y\end{bmatrix} \qquad (۱)$$

$$\theta_k=\frac{(k-1)\pi}{N_\theta} \quad \text{for} \quad k=1,2,\cdots,N_\theta$$

که در آن $\varphi\in(-\pi,\pi]$ نشان دهندهٔ اختلاف فاز و N_θ تعداد جهت‌هاي ترجیحي است. پارامتر σ عرض میدان دریافت سلول را مشخص مي‌کند. میزان بیضوي بودن میدان دریافت نیز به مقدار γ بستگي دارد (شکل۱). پارامتر φ یک اختلاف فاز است و تقارن پاسخ ضربهٔ مربوط به سلول ساده را مشخص مي‌کند. پاسخ ضربهٔ سلول ساده براي $\varphi=0$ و $\varphi=\pi$ متقارن (زوج) و براي $\varphi=\pi/2$ و $\varphi=-\pi/2$ نامتقارن (فرد) بوده و براي سایر مقادیر نیز نامتقارن است.



شکل ۱- نگاشت شدت روشنایي پاسخ ضربهٔ سلول ساده که مرکز آن در مبداء قرار گرفته است. مقادیر θ و γ در شکل مشخص شده‌اند. در تمام موارد $\sigma=7$، $\varphi=\pi/2$ و $\lambda=2\pi\sigma^2$ انتخاب شده است. سطوح خاکستري روشن‌تر و تیره‌تر از زمینه به‌ترتیب نشان دهندهٔ مقادیر مثبت و منفي براي پاسخ ضربه هستند. بیضي سفید $x^2+\gamma^2y^2=4\sigma^2$ محدودهٔ میدان دریافت را مشخص مي‌کند. مقدار پاسخ ضربه در خارج از این محدوده ناچیز است.

---

[7] Psycho vision

[8] Gabor

۲-۲- محاسبة پارامترهاي مدل سلول ساده

در سال ۱۹۸۶، کني براي آشکارسازي يک لبة پلة آغشته به نويز سفيد گوسي سه معيار مطرح کرد. کم بودن احتمال خطا در تشخيص/ عدم تشخيص نقاط لبه، نزديک بودن نقاط مشخص شده به‌عنوان لبه به مرکز لبه‌هاي واقعي و پاسخ يگانه به لبه، سه معياري هستند که کني براي يک عملگر آشکارساز لبه در نظر گرفت. او با فرمول‌بندي اين معيارها و حل عددي مسالة بهينه‌سازي حاصل نشان داد که عملگر مشتق گوسي قادر است اين معيارها را به‌صورت تقريبي بهينه کند [۴].

در اين بخش پارامترهاي مدل محاسباتي سلول ساده به گونه‌اي محاسبه شده‌اند که عملگر مشتق گوسي، تقريب مرتبة اول مدل سلول ساده باشد. رابطة ۲، عملگر مشتق گوسي در جهت x را نشان مي‌دهد.

$$G'_\sigma(x,y)=\frac{-x}{\sigma^2}e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \qquad (۲)$$

مدل محاسباتي سلول ساده در جهت x (همان جهت θ_1) و به ازاي $\gamma=1$ نيز در رابطة ۳ نشان داده شده است.

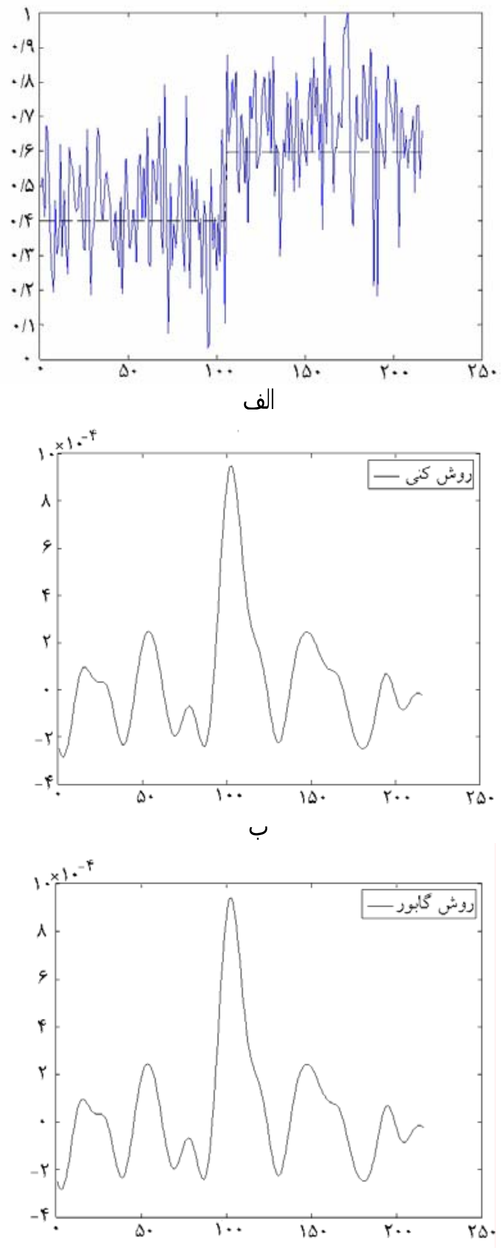
$$h_{\sigma,\lambda,\theta_1,\varphi}(x,y)=\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x+\varphi\right)e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \qquad (۳)$$

چنانچه بسط تيلور تابع $\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x+\varphi\right)$ حول نقطة $x=0$ نوشته شده و از توان‌هاي مرتبة دو به بالا صرف‌نظر شود، رابطة ۴ به‌دست مي‌آيد:

$$\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x+\varphi\right)=\cos\varphi+\frac{2\pi x}{\lambda}\sin\varphi \qquad (۴)$$

اگر بجاي $\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x+\varphi\right)$ در رابطة ۳ معادل آن از رابطة ۴ جايگزين شده و رابطة حاصل با رابطة ۲ هم‌ارز قرار داده شود، پارامترهاي مدل سلول ساده براي تقريب بهينة معيارهاي مطرح شده به‌وسيله کني به‌دست مي‌آيند:

$$\lambda=2\pi\sigma^2 \quad , \quad \varphi=\pi/2 \qquad (۵)$$



الف

ب

ج

شکل ۲- پاسخ مدل محاسباتي سلول ساده و عملگر مشتق گوسي به لبة پلة آغشته به نويز سفيد گوسي: الف) لبة پلة آغشته به نويز سفيد گوسي، ب) پاسخ عملگر مشتق گوسي به اين لبه و ج) پاسخ مدل محاسباتي سلول ساده.

با انتخاب پارامترهاي فوق، عملگر مشتق گوسي تقريب مرتبة اول مدل سلول ساده خواهد بود. انتظار مي‌رود که مدل سلول ساده در مقايسه با عملگر مشتق گوسي تقريب بهينه‌تري از معيارهاي مطرح شده به‌وسيله کني را مهيا کند. در شکل ۲، پاسخ مدل سلول ساده و همچنين عملگر مشتق گوسي به ازاء مقدار σ يکسان نشان داده شده‌اند.

۲-۳- روش پیشنهادی برای تخمین گرادیان

در هر پیکسل تصویر اطلاعات لبه از روی مقادیر شدت روشنایی در همسایگی همان پیکسل به‌دست می‌آید. چنانچه در محل یک پیکسل تغییرات شدت روشنایی در یک جهت مشخص زیاد باشد، پاسخ عملگر گرادیان حساس به همان جهت در محل پیکسل مورد نظر زیاد خواهد بود. بر این اساس، بسیاری از آشکارسازهای لبه از عملگرهای گرادیان حساس به جهت برای مشخص کردن محل پیکسل‌های لبه استفاده می‌کنند.

در روش پیشنهادی برای تخمین بردار گرایان ابتدا پاسخ مدل سلول ساده در N_θ جهت ترجیحی محاسبه می‌شود. پارامترهای مربوط به مدل سلول ساده همان مقادیر محاسبه شده در بخش قبل انتخاب می‌شوند. سپس برای تخمین بردار گرادیان، از جمع وزندار پاسخ‌های مربوط به مدل سلول ساده در جهت‌های ترجیحی مختلف به‌صورتی که در رابطهٔ ۶ نشان داده شده استفاده می‌شود:

$$IG_\sigma(x,y)=\sum_{k=1}^{N_\theta} e^{j\theta_k} S_{\sigma,2\pi\sigma^2,\theta_k,\frac{\pi}{2}}(x,y) \qquad (۶)$$

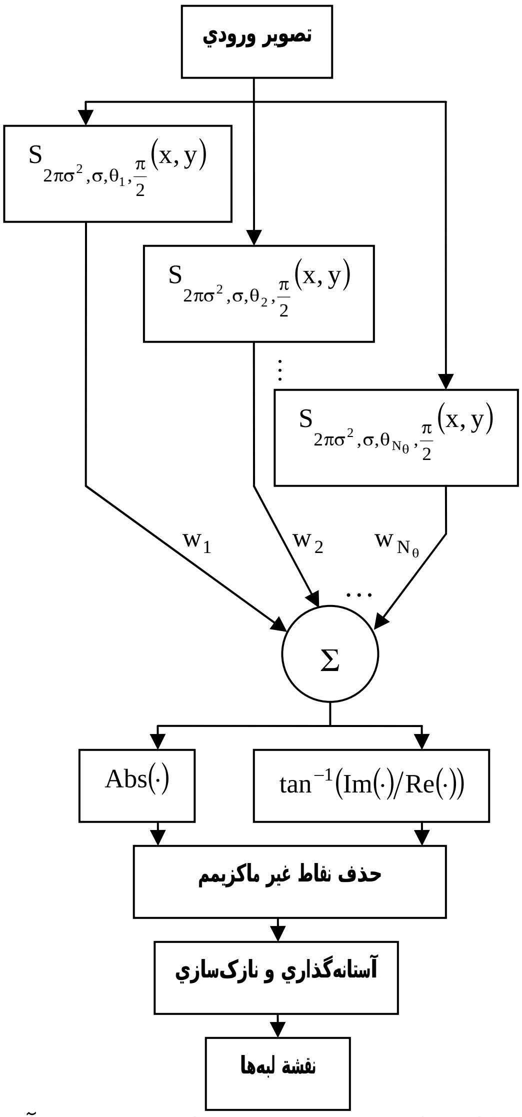
که در آن $j=\sqrt{-1}$ است.

مقدار محاسبه شده در رابطهٔ ۶ یک مقدار مختلط است. اندازه و زاویهٔ این مقدار مختلط به‌ترتیب به‌عنوان تقریبی از اندازه و زاویهٔ بردار گرادیان در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{aligned} |IG_\sigma(x,y)| &= \sqrt{\mathrm{Re}^2(IG_\sigma(x,y))+\mathrm{Im}^2(IG_\sigma(x,y))} \\ \theta(x,y) &= \tan^{-1}\left(\frac{\mathrm{Im}(IG_\sigma(x,y))}{\mathrm{Re}(IG_\sigma(x,y))}\right) \end{aligned} \qquad (۷)$$

با معلوم بودن اندازه و زاویهٔ گرادیان برای هر نقطهٔ تصویر، نقشهٔ لبه‌ها با استفاده از الگوریتم شناخته شدهٔ حذف نقاط غیربیشینه، آستانه‌گذاری دو مقداری و به‌دنبال آن نازک‌سازی به‌دست می‌آید [۱-۴].

طرح نموداری روش پیشنهادی برای تخمین بردار گرادیان در شکل ۳ نشان داده شده است. می‌توان فرض کرد که مراحل متوالی پردازش اطلاعات در این طرح نموداری، یک مدل فرضی از مفهوم ابرستون[9] در سیستم بینایی انسان است.



شکل۳- طرح نموداری روش پیشنهادی برای به‌دست آوردن نقشهٔ لبه‌ها. بردار گرادیان در هر نقطهٔ تصویر با استفاده از جمع وزن‌دار پاسخ مدل سلول ساده در تمام جهت‌ها محاسبه می‌شود. سپس نقشهٔ لبه‌ها با اعمال الگوریتم شناخته شدهٔ حذف نقاط غیر بیشینه و به‌دنبال آن آستانه‌گذاری دومقداری و نازک‌سازی روی اندازه و زاویهٔ این بردار گرادیان به‌دست می‌آید.

مطالعات نروفیزیولوژیکی نشان داده‌اند که میدان‌های دریافت نواحی مجاور در کورتکس اولیهٔ بینایی، روی شکبیه نیز در مجاورت هم هستند [۸]. کورتکس اولیهٔ بینایی دارای تعدادی لایهٔ افقی است که انواع مختلف سلول‌ها و اتصالات را شامل می‌شوند. اگر یک الکترود به‌صورت عمود بر سطح کورتکس بینایی وارد شده و پاسخ چند سلول ثبت شود، مشاهده خواهد شد که تمام این سلول‌ها به یک جهت ترجیحی خاص پاسخ می‌دهند. این سلول‌های حساس

---

[9] Hyper column

به جهت، در يک بخش مجزا به نام ابرستون قرار گرفته‌اند. هر ابرستون شامل سلول‌هايي است که به يک ناحية خاص از تصوير پاسخ مي‌دهند و مجموعة اين سلول‌ها تصوير را در تمام جهت‌ها با فواصل افزايشي ده درجه پردازش مي‌کنند. ابرستون‌هاي مجاور، نواحي مجاور در تصوير شبکيه را پردازش مي‌کنند. وجود ساختار ابرستون با استفاده از برچسب‌زني راديواکتيو ثابت شده است [۱۷]. در اين تکنيک ابتدا 2deoxyglucose راديواکتيو به يک حيوان تزريق مي‌شود. اين مادة شيميايي در فرآيند سوخت و ساز سلول‌ها استفاده شده و فرآورده‌هاي سوخت و سازي راديواکتيو در آنها به‌جا مي‌گذارد. سپس حيوان براي ۴۵ دقيقه در معرض تحريک بينايي شامل نوارهايي با جهت‌هاي يکسان قرار مي‌گيرد. سلول‌هاي فعال در مقايسه با سلول‌هاي غير فعال مقدار بيشتري از مادة راديواکتيو را جذب مي‌کنند و بنابراين به‌صورت راديواکتيوي برچسب مي‌خورند. بعد از ۴۵ دقيقه حيوان قرباني شده و کورتکس بينايي حيوان به‌صورت صفحات خيلي نازک برش خورده و روي صفحات عکس‌برداري حساس به تشعشع قرار مي‌گيرد. هنگامي که اين اتوراديوگراف‌ها ظاهر مي‌شوند، نوارهاي باريک جهت، روي برش‌هاي افقي کورتکس بينايي ظاهر مي‌شوند.

۴-۲- روش‌هاي ارزيابي کارايي آشکارساز لبه

کارايي يک آشکارساز لبه را مي‌توان به‌صورت کيفي و با مشاهدة نتايج حاصل از آن در آشکارسازي لبه از تصاوير ساختگي يا طبيعي انجام داد. به‌علاوه، چنانچه نقشة مرجع لبه‌ها موجود باشد، با مقايسة لبه‌هاي آشکار شده و لبه‌هاي مرجع، ارزيابي کمي کارايي آشکارساز لبه نيز امکان پذير است [۸]. در اين تحقيق براي ارزيابي کمي نتايج از معيار شباهت و همچنين منحني ROC[۱۰] استفاده شده است [۱۸، ۱۹].

فرض کنيد E_{GT} و B_{GT} به‌ترتيب نشان دهندة مجموعه پيکسل‌هاي لبه و مجموعه پيکسل‌هاي زمينة مربوط به نقشة مرجع باشند. همچنين E_D و B_D به‌ترتيب معرف مجموعه پيکسل‌هاي لبه و مجموعه پيکسل‌هاي زمينة مربوط به تصوير لبه‌هاي آشکار شده به‌وسيله يک عملگر باشند. اشتراک نقاط لبة مرجع و نقاط لبة آشکار شده به‌وسيله عملگر، نشان دهندة پيکسل‌هاي لبه‌اي است که به درستي آشکار شده‌اند، $E_{TP} = E_D \cap E_{GT}$. همچنين اشتراک نقاط زمينة مرجع و نقاط زمينة مشخص شده به‌وسيله عملگر، نشان دهندة پيکسل‌هاي زمينه‌اي است که به درستي آشکار شده‌اند، $E_{TN} = B_D \cap B_{GT}$. لبه‌هاي مرجعي که به‌وسيله عملگر آشکارساز لبه آشکار نشده‌اند (اشتباهات منفي)، به‌وسيله مجموعة $E_{FN} = B_D \cap E_{GT}$ مشخص مي‌شوند. همچنين لبه‌هاي کاذبي که به‌وسيله عملگر آشکارساز لبه آشکار شده‌اند (اشتباهات مثبت)، به‌وسيله مجموعة $E_{FP} = E_D \cap B_{GT}$ مشخص مي‌گردند. معيار کارايي آشکارساز لبه به‌صورت زير تعريف مي‌شود [۸].

$$p = \frac{\mathrm{card}(E_{TP})}{\mathrm{card}(E_{TP}) + \mathrm{card}(E_{FP}) + \mathrm{card}(E_{FN})} \tag{۸}$$

در رابطة ۸، $\mathrm{card}(x)$ به تعداد عناصر مجموعة x اشاره دارد. معيار کارايي، p؛ يک عدد اسکالر است که بين صفر و يک تغيير مي‌کند. اگر تمامي پيکسل‌هاي لبه به درستي آشکار شوند و هيچ پيکسل زمينه‌اي به اشتباه لبه آشکار نشود، مقدار p برابر يک خواهد شد. در غير اين‌صورت هر چه نقاط لبه بيشتر به اشتباه آشکار شوند (يا نشوند) مقدار p به صفر نزديک‌تر خواهد شد.

پيکسل‌هاي تصوير، بسته به اينکه مقدار گراديان شدت روشنايي به‌ترتيب بيشتر يا کمتر از يک مقدار آستانه باشد به E_D يا B_D طبقه‌بندي مي‌شوند. هر مقدار آستانه بسته به مقادير احتمال جواب‌هاي درست $(P(E_D \mid E_{GT}))$ و اشتباهات مثبت $(P(E_D \mid B_{GT}))$، نقطه‌اي روي منحني ROC را مشخص مي‌کند.

احتمال جواب‌هاي درست[۱۱] از رابطة ۹ قابل محاسبه است.

$$\mathrm{sensitivity} = \frac{\mathrm{card}(E_{TP})}{\mathrm{card}(E_{TP}) + \mathrm{card}(E_{FN})} \tag{۹}$$

احتمال اشتباهات منفي[۱۲] از رابطة ۱۰ محاسبه مي‌شود.

$$(1 - \mathrm{specificity}) = \frac{\mathrm{card}(E_{FP})}{\mathrm{card}(E_{FP}) + \mathrm{card}(E_{TN})} \tag{۱۰}$$

---

[10] Receiver Operating Characteristic

[11] Sensitivity

[12] Specificity

منحني ROC از ترسيم احتمال جواب‌هاي درست بر حسب احتمال اشتباهات منفي به ازاي مقادير مختلف آستانه حاصل مي‌گردد.

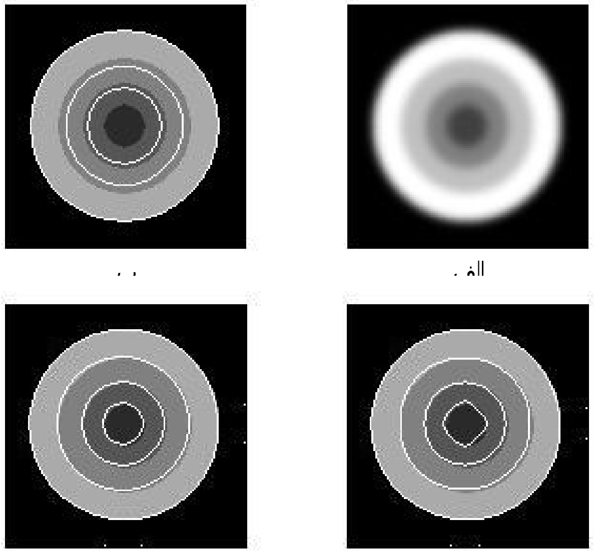
عمل حذف نقاط غيربيشينه باعث مي‌شود كه منحني ROC به خطاهاي موجود در نقشة مرجع لبه‌ها حساس شود. براي رفع اين مشكل از روش پيشنهاد شده در مرجع [۱۹] استفاده شده است. به اين ترتيب كه قبل از محاسبة E_{TP} و E_{FN} يک عملگر مورفولوژيكي opening روي نقشة لبه‌هاي آشكار شده اعمال گرديده به‌گونه‌اي كه لبه‌ها تا يک پيكسل مجاور از هر طرف انتشار پيدا كنند. براي محاسبة E_{FP} و E_{TN} علاوه بر اعمال عملگر مورفولوژيكي بالا روي نقشة لبه‌هاي آشكار شده، يک عملگر مورفولوژيكي opening روي نقشة لبه‌هاي مرجع نيز اعمال مي‌شود به گونه‌اي كه لبه‌ها تا سه پيكسل مجاور از هر طرف انتشار يابند.

۳- نتايج

روش پيشنهادي، سه پارامتر را در ورودي دريافت مي‌كند. پارامتر انحراف معيار ضريب گوسي (σ) و مقدار آستانه، همان پارامترهايي هستند كه روش كني در ورودي دريافت مي‌كند. پارامتر γ در روش پيشنهادي، ميزان بيضوي بودن ميدان دريافت را كنترل مي‌نمايد. چنانچه مقدار γ از يک كمتر (يا بيشتر) باشد، ميدان دريافت سلول ساده در امتداد لبه گسترده (فشرده) شده و متوسط‌گيري بيشتري (يا كمتري) در اين راستا انجام خواهد شد. در صورتي كه مقدار γ برابر يک باشد، ميدان دريافت مدل سلول ساده همان ميدان دريافت عملگر مشتق گوسي خواهد بود (شكل۱). در اين حالت اگر فقط دو جهت ترجيحي در نظر گرفته شوند، تنها تفاوت روش پيشنهادي و روش كني در نوع عملگر مورد استفاده براي تخمين بردار گراديان خواهد بود.

شكل ۴ - الف تصوير حلقه‌هاي مات شدة هم مركز را نشان مي‌دهد. در شكل‌هاي ۴ - ب و ۴ - ج به‌ترتيب لبه‌هاي آشكار شده از اين تصوير با استفاده از عملگر مشتق گوسي و لبه‌هاي آشكار شده به‌وسيله مدل سلول ساده نشان داده شده‌اند. در هر دو روش σ برابر ۴ در نظر گرفته شده است. با مقايسة شكل‌هاي ۴ - ب و ۴ - ج مشخص مي‌شود كه مدل سلول ساده چه از نظر آشكارسازي لبه و چه از نظر تعيين دقيق موقعيت لبه، كارايي بهتري از عملگر مشتق گوسي دارد. براي اينكه اين مقايسه امكان‌پذير باشد، لبه‌ها روي تصوير حلقه‌هاي هم مركز قبل از مات شدن نشان داده شده‌اند. در روش كني، مقدار آستانه كمترين مقدار ممكن در نظر گرفته شده است (۲/۲۲۰۴×$۱۰^{-۱۶}$). براي روش پيشنهادي با بالا بردن مقدار آستانه تا ۰/۱۵ نيز همين نتايج به‌دست مي‌آيد. تا اينجا مي‌توان انتظار داشت كه روش پيشنهادي براي تصاويري كه مات شده‌اند كارايي بهتري از روش كني داشته باشد.

با مقايسة دو شكل۴ - ج و ۴ - د مشخص مي‌شود كه زياد بودن تعداد جهت‌هاي ترجيحي به تعيين دقيق موقعيت لبه‌ها (به‌ويژه براي لبه‌هايي كه انحناء آنها زياد است) كمک مي‌كند. همان‌طور كه مشاهده مي‌شود، لبه‌هاي مربوط به دايرة مركزي در اين حالت بهتر آشكار شده‌اند. اين لبه‌ها در روش كني آشكار نشده‌اند و در روش پيشنهادي با دو جهت ترجيحي به خوبي مكان‌يابي نشده‌اند.



الف ب

ج د

شكل۴- لبه‌هاي آشكار شده به‌وسيله روش كني ب) روش پيشنهادي با $\gamma = 1$ و $N_\theta = 2$؛ ج) و روش پيشنهادي با $\gamma = 1$ و $N_\theta = 8$؛ د) براي تصوير ساختگي حلقه‌هاي مات شدة هم مركز (الف). در تمامي موارد آستانه كمترين مقدار ممكن (۲/۲۲۰۴×$۱۰^{-۱۶}$) و $\sigma = 4$ انتخاب شده است.

در تصويربرداري پزشکي هدف نسبت دادن شدت روشنايي يکسان و متمايز از شدت روشنايي سلول‌هاي متعلق به ساير بافت‌ها به سلول‌هاي متعلق به يک بافت خاص است. در عمل مشکلاتي از قبيل جابجا شدن‌هاي بيمار، SNR پايين دستگاه و اعضاء مشابه، باعث مي‌شوند که مرزهاي عضوها مات يا حتي محو شوند و يا اينکه موجود نباشند. موارد ذکر شده سبب مي‌شوند طبيعت تصاوير پزشکي با فرض‌هاي در نظر گرفته شده در اين مسأله سازگاري داشته باشد. بر اين اساس انتظار مي‌رود روش پيشنهادي در مقايسه با روش مرسوم کني، در آشکارسازي لبه‌ها از تصاوير پزشکي کارايي بهتري داشته باشد. در ادامه کارايي روش پيشنهادي و روش کني در آشکارسازي لبه از تصاوير ساختگي و پزشکي به‌صورت کيفي و کمي با يکديگر مقايسه شده‌اند.

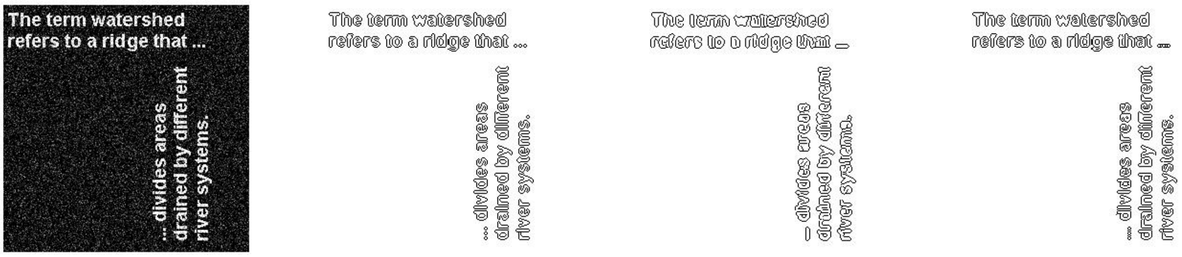
براي نشان دادن برتري مدل سلول ساده (با پارامترهاي محاسبه شده در اين تحقيق) بر عملگر مشتق گوسي فقط دوجهت ترجيحي براي روش پيشنهادي در نظر گرفته شده است. مقدار پارامتر γ نيز برابر يک در نظر گرفته شده است. در هر دو روش، پارامتر σ در محدودة ۱ تا ۴ با پله‌هاي افزايشي ۰/۲ تغيير داده شد. مقدار آستانه نيز در محدودة بين صفر تا ۰/۹۵ با پله‌هاي افزايش ۰/۰۵ تغيير داده شده است. تصاوير مورد استفاده به همراه نقشه‌هاي لبة مرجع مربوط به آنها در شکل ۵ نشان داده شده‌اند. همچنين در اين شکل، بهترين نقشة لبة آشکار شده به‌وسيله روش پيشنهادي و روش کني از نظر معيار شباهت، p؛ قابل مشاهده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده مي‌شود، نقشه‌هاي لبة به‌دست آمده به‌وسيله روش پيشنهادي در مقايسه با نقشه‌هاي لبة به‌دست آمده به‌وسيله روش کني به نقشة مرجع لبه‌ها شبيه‌تر است.

در شکل ۶ و شکل ۷ متوسط معيار شباهت به‌دست آمده از روش کني و روش پيشنهادي با هم مقايسه شده است. در هر يک از اين شکل‌ها، به ازاي مقدار مشخصي از يک پارامتر، متوسط معيار شباهت براي همة مقادير ممکن پارامتر ديگر محاسبه شده است. متوسط معيار شباهت مربوط به روش پيشنهادي و روش کني براي نقشه‌هاي لبة استخراج شده از روي همة تصاوير به ازاي تمام پارامترهاي ورودي در بازه‌هاي ذکر شدة بالا، در جدول ۱ آمده است. اين جدول نشان مي‌دهد که لبه‌هاي به‌دست آمده به‌وسيله روش پيشنهادي از نظر معيار شباهت (p) به لبه‌هاي مرجع شبيه‌ترند.

در اين تحقيق، علاوه بر متوسط معيار شباهت، p؛ از معيار منحني ROC نيز براي ارزيابي عملکرد روش پيشنهادي استفاده شده است. براي هر يک از مقادير آستانه، ابتدا مقادير متوسط احتمال جواب‌هاي درست و احتمال اشتباهات منفي براي همة تصاوير و به ازاي تمام مقادير σ محاسبه شده و سپس با استفاده از مقادير متوسط احتمال جواب‌هاي درست و احتمال اشتباهات منفي به ازاي تمام مقادير آستانه، منحني ROC ترسيم مي‌شود. هر چه سطح زير منحني ROC بيشتر باشد، کارايي روش بهتر خواهد بود. به‌عبارت ديگر، هر چه منحني ROC به گوشة بالا سمت چپ بيشتر متمايل باشد بهتر است. منحني‌هاي ROC روش پيشنهادي و روش کني در شکل ۸ نشان داده شده‌اند. مشاهده مي‌شود که با در نظر گرفتن اين معيار کارايي نيز روش پيشنهادي در مقايسه با روش کني لبه‌ها را بهتر آشکار مي‌کند.

۴- بحث

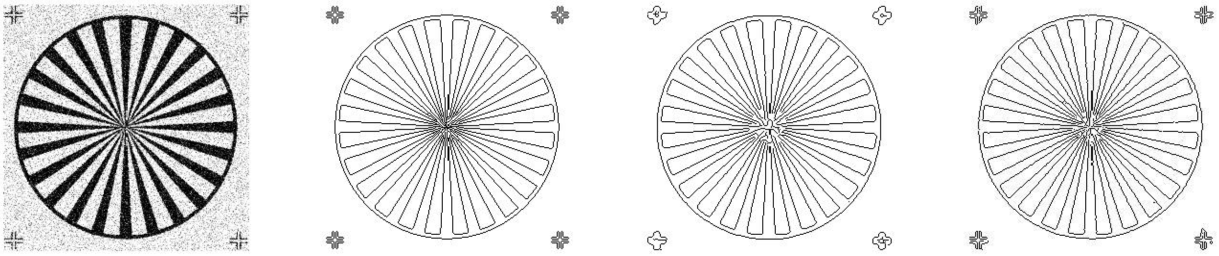
خروجي عملگر آشکارساز لبه بيشتر در پردازش‌هاي بينايي سطوح بالاتر مانند بازشناسي، ناحيه‌بندي، فشرده‌سازي و ... استفاده مي‌شود [۴]. بنابراين کارايي مناسب، پايداري خوب در برابر تغيير پارامترها و قابليت اطمينان بالاي آشکارساز لبه از اهميت زيادي برخوردار است. چنانچه مقدار σ در حد کم انتخاب شود، لبه‌هاي مربوط به ساختارهاي ريز بهتر آشکار خواهند شد. در اين حالت لبه‌ها بهتر مکان‌يابي مي‌شوند. هرچند که مشکل آشکار شدن لبه‌هاي کاذب ناشي از نويز و آشکار نشدن لبه‌هاي مات بروز خواهد کرد. بالا بردن مقدار آستانه به ميزان زيادي لبه‌هاي ناشي از نويز را از بين مي‌برد. اما اين خطر وجود دارد که لبه‌هاي ضعيف (که تغيير شدت روشنايي در محل آنها کم است) نيز حذف شوند. اگر پارامتر انحراف معيار بزرگ انتخاب شود، اثر نويز کم شده و لبه‌هاي مات بهتر آشکار مي‌شوند. البته در اين حالت مکان‌يابي لبه‌ها به‌خوبي انجام نمي‌شود.



آستانة بالا = ۰/۵۰
عرض میدان دریافت = ۱/۲۰

آستانة بالا = ۰/۲۵
عرض گوسي = ۱/۰۰

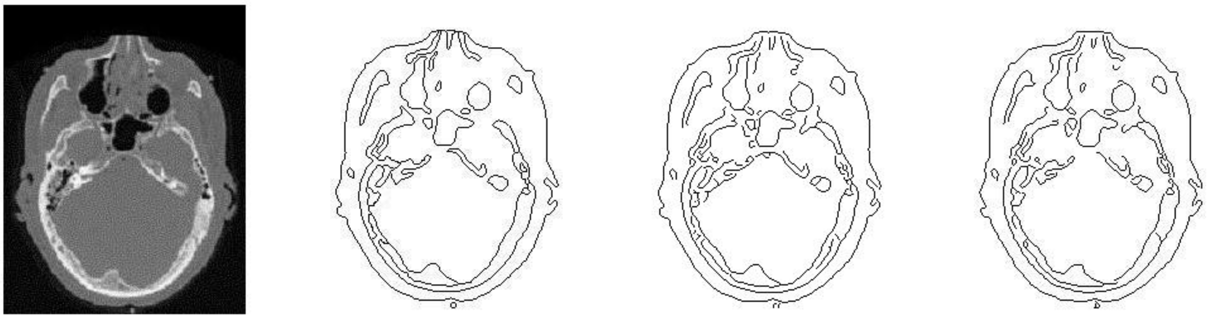
تصویر متن



آستانة بالا = ۰/۴۰
عرض میدان دریافت = ۱/۲۰

آستانة بالا = ۰/۲۰
عرض گوسي = ۱/۰۰

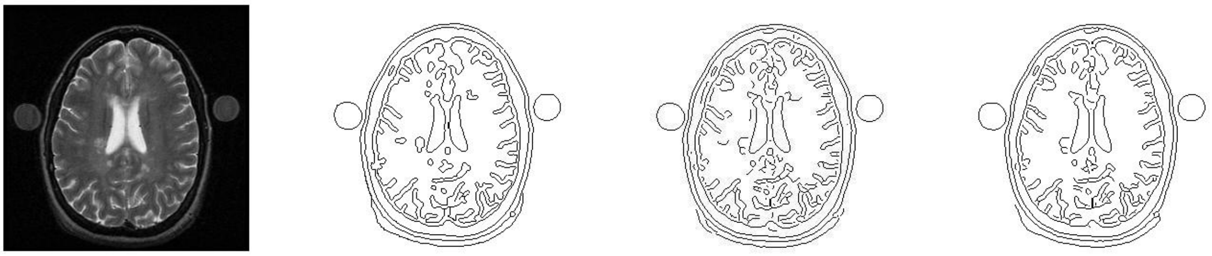
تصویر الگو



آستانة بالا = ۰/۳۵
عرض میدان دریافت = ۱/۴۰

آستانة بالا = ۰/۲۵
عرض گوسي = ۱/۲۰

تصویر CT



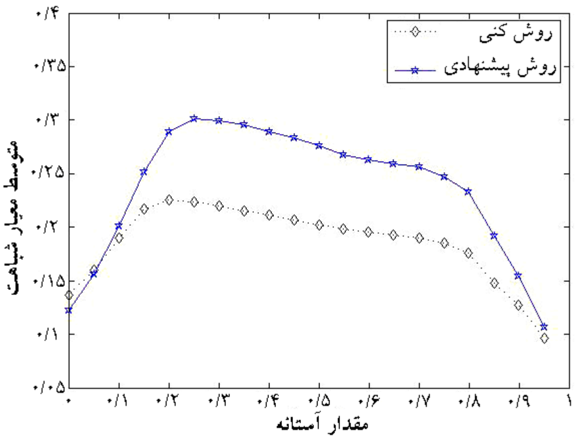
آستانة بالا = ۰/۱۵
عرض میدان دریافت = ۱/۶۰

آستانة بالا = ۰/۲۰
عرض گوسي = ۱/۲۰

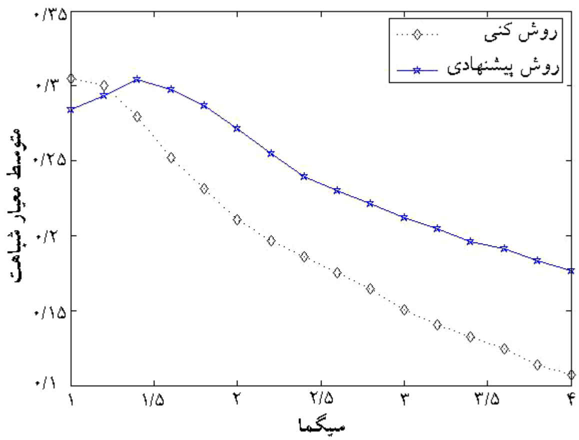
تصویر MR

شکل ۵- از چپ به راست: تصاویر اصلي، نقشه‌هاي لبة مرجع مربوط به آنها، بهترین نقشه‌هاي لبة به‌دست آمده به‌وسیله روش کني و روش پیشنهادي، بر اساس معیار p .

تغییرات آستانه بین ۰ تا ۰/۹۵ با پله‌هاي افزایشي ۰/۰۵ و تغییرات عرض میدان دریافت بین ۱ تا ۴ با پله‌هاي افزایشي ۰/۲ در نظر گرفته شده‌اند. مقادیر پارامترهاي آستانه و عرض میدان دریافت براي بهترین نقشه‌هاي لبة به‌دست آمده به‌وسیله هر کدام از روش‌ها در زیر آنها نوشته شده است.



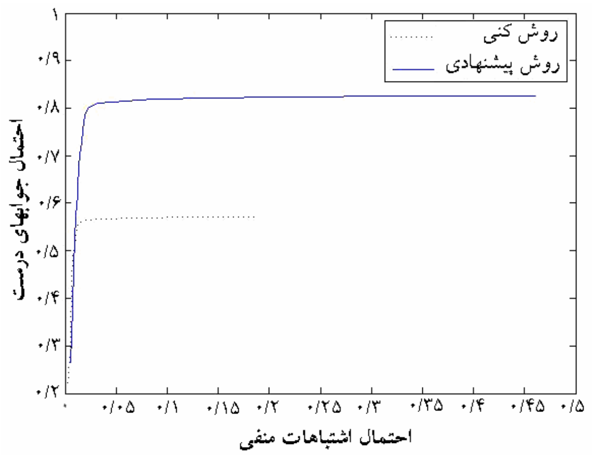
شکل ۶- متوسط معيار شباهت به‌دست آمده از روش کني و روش پيشنهادي براي مقادير σ بين ۱ تا ۴ با پله‌هاي افزايشي ۰/۲ بر حسب تغييرات مقدار آستانه



شکل ۷- متوسط معيار شباهت به‌دست آمده از روش کني و روش پيشنهادي براي مقادير آستانة بين ۰ تا ۰/۹۵ با پله‌هاي افزايشي ۰/۰۵ بر حسب تغييرات مقدار σ

جدول۱- متوسط معيار شباهت مربوط به روش پيشنهادي و روش کني به ازاي مقادير σ بين ۱ تا ۴ با پله‌هاي افزايشي ۰/۲ و مقادير آستانة بين ۰ تا ۰/۹۵ با پله‌هاي افزايشي ۰/۰۵ براي تصاوير نشان داده شده در شکل ۵

تصوير	روش کني	روش پيشنهادي
تصوير متن	۰/۱۴۷۱	۰/۲۲۴۹
تصوير الگو	۰/۲۷۴۴	۰/۳۰۴۸
تصوير CT	۰/۱۳۶۰	۰/۱۸۲۱
تصوير MR	۰/۰۸۵۰	۰/۱۱۷۷



شکل ۸- منحني ROC براي تصاوير نشان داده شده در شکل ۵

در مقادير کم آستانه و انحراف معيار، متوسط کارايي روش کني اندکي از کارايي روش پيشنهادي بهتر است. اما قابليت پايداري روش پيشنهادي در برابر تغييرات پارامترهاي ورودي مي‌تواند اين ضعف را پوشش دهد.

همانطور که در شکل ۴ مشاهده شد مدل سلول ساده محل لبه‌ها را خيلي بهتر از عملگر مشتق گوسي مکان‌يابي مي‌کند. اين امر در شکل ۵ نيز به روشني مشهود است. بهترين جواب‌ها در روش پيشنهادي معمولاً با مقادير بيشتر آستانه و انحراف معيار به‌دست آمده‌اند. به‌عنوان نمونه روش پيشنهادي با وجود برخورداري از مقدار انحراف معيار بالاتر نسبت به روش کني، مکان لبه‌ها در مرکز تصوير الگو را بهتر مشخص کرده است.

شايان ذکر است هرچند افزايش تعداد جهت‌هاي ترجيحي سبب بهبود عملکرد آشکارساز لبه مي‌شود (شکل ۴) اما از سوي ديگر هزينة محاسباتي را بالا مي‌برد. بنابراين درصورتي‌که دقت زيادي مورد نظر نباشد، فقط دو جهت ترجيحي در نظر گرفته مي‌شوند.

۵- نتيجه‌گيري

در اين تحقيق با الهام از سيستم بينايي انسان روشي براي آشکارسازي لبه ارائه شد. اين روش در بازة وسيعي از مقادير پارامترهاي ورودي کارايي بهتري از روش کني دارد. به‌عبارت ديگر روش پيشنهادي در برابر تغييرات پارامترهاي

ورودي پايدارتر است (شکل ۷ و شکل ۸). در اين روش مي‌توان مقادير آستانه و انحراف معيار را بيشتري نسبت به روش کني مقادير انتخاب کرد بدون اينکه مشکل جابجا شدن مکان لبه‌ها و يا حذف شدن لبه‌هاي ضعيف پيش آيد. با اين کار، امکان آشکارسازي بهتر لبه‌هاي مات شده و حذف مؤثر نويز وجود دارد.

در روش پيشنهادي از پاسخ سلول ساده براي آشکارسازي لبه استفاده شده است. بنابراين مدل حساسيت سيستم بينايي به شدت روشنايي را نيز مي‌توان به‌عنوان يک مرحلة پردازشي در اين الگوريتم وارد کرد.

سپاسگزاري

اين تحقيق با حمايت مالي مرکز تحقيقات مخابرات ايران انجام شده است. بدين‌وسيله از مسئولين محترم اين مرکز تشکر و قدرداني به‌عمل مي‌آيد.

مراجع

[1] Canny J.; A computational approach to edge detection; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1986; PAMI-8: 679-697.

[2] Shen J. and Castan S.; An optimal linear operator for step edge detection; Graph. Models Image Process. 1992; 54(1): 112-133.

[3] Rakesh R.R., Chaudhuri P., and Murthy C.A.; Thresholding in edge detection: a statistical approach; IEEE Trans. On Image Processing 2004; 13(7): 927-936.

[4] Parker J.R.; Algorithms for image processing and computer vision; New York: John Wiley & Sons; 1997; 1-66.

[5] Gevers T.; Adaptive image segmentation by combining photometric invariant region and edge information; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 2002; 24(6): 848-852.

[6] Eugenio F. and Marques F.; Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach; IEEE Trans. On Georeference and Remote Sensing 2003; 41(12): 2869-2880.

[7] Mahmud S., Williams L.R., Thornber K.K., and Xu K.; Segmentation of multiple salient closed contours from real images; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 2003; 25(4): 433-444.

[8] Grigorescu C., Petcov N., Westenberg M.A.; Contour detection based on nonclassical receptive field inhibition; IEEE Trans. On Image Processing 2003; 12(7): 729-739.

[9] Petcov N. and Westenberg M.A.; Suppression of contour perception by band-limited noise and its relation to non classical receptive field inhibition; Bio. Cybern 2003; 88: 236-246.

[10] Zhu C. and Jiang T.; Multi context fuzzy clustering for separation of brain tissues in magnetic resonance images; Academic Press, Nero Image 2003; 18: 685–696.

[11] Rossi A.F., Desimone R., and Ungerleider G.; Contextual modulation in primary visual cortex of macaques; the Journal of Neuroscience 2001; 21(5): 1698-1709.

[12] Jones H.E., Grive K.L., Wang W., and Sillito A.M.; Surround suppression in primate V1; J. Neurophysiol. 2001; 86(10): 2011-2028.

[13] Nothdurf H.C., Gallant J.L., and Van Essen D.C.; Response modulation by texture surround in primate area v1: correlates of “pop out” under anesthesia; Vis. Neurosci. 1999; 16: 15-34.

[14] Li Zh.; Pre-attentive segmentation in the primary visual cortex; Spatial Vision 2000; 13(1): 25-50.

[15] Grigoresco S.E., Petkov N., and Kruizinga P.; Comparison of texture features based on Gabor filters; IEEE Trans. On Image Processing 2002; 11(10): 1160-1167.

[16] Kruizinga P. and Petkov N.; Non-linear operator for oriented texture; IEEE Trans. On Image Processing 1999; 8(10): 1395-1407.

[17] Huble D.H.; Explorations of the primary visual cortex; Nature 1982; 229:515-524.

[18] Yitzhaky Y., Peli E.; A method for objective edge detection evaluation and detector parameter selection; IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence 2003; 25(8): 1027-1033.

[19] Konishi S., Yuille A.L., Coughlan J. M., and Zhi S.C.; Statistical edge detection: learning and evaluating edge cues; IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence 2003; 25(1): 57-74.