

## آشکارسازی لبه با دقت زیر پیکسل

مسعود علی دوست<sup>۱</sup>، منصور زینلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران Masoud.Alidoust@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار - دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران Mansoor.Zeinali@gmail.com

چکیده - آشکارسازی لبه یکی از مهم‌ترین مسائل مطرح در پردازش تصویر و بینایی ماشین می‌باشد. لبه‌یابی یکی از فرآیندهای مرتبه پایین در پردازش تصاویر می‌باشد، به طوری که عملکرد فرآیندهای مرتبه بالاتر مانند تشخیص اشیاء، قطعه‌بندی و کدگذاری تصاویر مستقیماً به کارایی این پردازش سطح پایین وابسته است. برای کاربردهای عملی که دقت مورد نظر است، آشکارسازی در مقیاس زیر پیکسل معرفی و اجرا می‌شود. در این مقاله، به معرفی و مقایسه سه روش آشکارسازی لبه با دقت زیر پیکسل پرداخته می‌شود. ابتدا، نتایج شبیه‌سازی برای تصویر ایده‌آل بررسی خواهد شد. سپس، نتایج برای تصویر نویزدار بر اساس مقادیر مختلف انحراف معیار مقایسه می‌شود و روش مقاوم، بر اساس حداقل خطا مشخص خواهد شد.

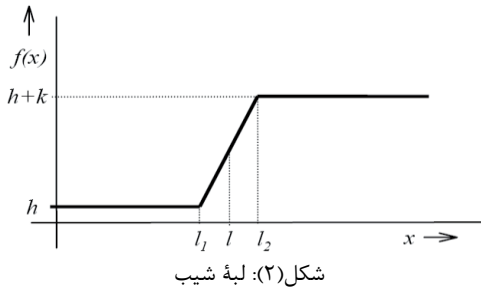
کلید واژه - پردازش تصویر، آشکارسازی لبه، انحراف معیار، دقت زیر پیکسل

می‌کنند، به دلیل تک مقیاس بودن عملگر، بهینه نبودن پاسخ خروجی و حساسیت زیاد به نویز کمتر استفاده می‌شوند. همچنین در این زمینه از عملگرهای بهینه مانند عملگر کنی [۸] و مار-هیلدرث [۹] نیز استفاده می‌شود. این عملگرها بر اساس بهینه‌سازی مجموعه‌ای از معیارها برای به دست آوردن عملگر مناسب برای تشخیص لبه، با توجه به تعریف ریاضی دقیق از لبه توسعه یافته‌اند. در روش کنی برای آشکارسازی لبه پله ایده‌آل ابتدا تصویر ورودی با یک فیلتر گاوسی با انحراف معیار مشخص هموار شده و تصویر حاصل با مشتق گاوسی در دو جهت افقی و عمودی کانالو می‌شود. سپس با توجه به اطلاعات اندازه و زاویه به دست آمده و استفاده از الگوریتم حذف نقاط غیرماکزیمم و آستانه‌گیری دو سطحی (هیستریزیس) لبه‌ها آشکار می‌شوند. علی‌رغم اینکه روش کنی از پرکاربردترین روش‌های آشکارسازی در مقیاس پیکسل است، نیاز آن به تنظیم یا تعیین پارامترهای ورودی از جمله مشکلات این روش است. چنانچه مقدار انحراف معیار مربوط به تابع گاوسی بزرگ انتخاب شود، لبه‌های مربوط به ساختارهای ریز از بین می‌رود. در مقابل اگر مقدار آستانه کوچک انتخاب شود، اثر بیشتری از نویز به خروجی منتقل خواهد شد. برای افزایش دقت، از آشکارسازی در مقیاس زیر پیکسل استفاده می‌شود. ایده اصلی این آشکارسازی، کلاس‌بندی پیکسل‌هاست. با توجه به این کلاس‌بندی، به تجزیه زیر پیکسل‌های هر پیکسل پرداخته می‌شود. این طبقه‌بندی زیر پیکسلی باعث کاهش خطا در تشخیص لبه خواهد شد.

### ۱- مقدمه

بی‌شک مهم‌ترین پارامتر در تصویر که درک آن بیشترین تأثیر را دارد لبه‌ها می‌باشند. در ساده‌ترین حالت، محل تغییرات در سطح روشنایی و نقاط ناپیوستگی تصویر که حداقل شامل چند پیکسل باشد را می‌توان لبه تعریف کرد [۱]. در حالت کلی لبه یک ویژگی محلی از تصویر نبوده و به ساختار تصویر در اطراف آن ناحیه نیز بستگی دارد. همچنین بر اساس تعریف لبه به عنوان محل تغییرات سطوح روشنایی، بازه این تغییرات نیز باید مورد توجه قرار گیرد تا در مورد وجود لبه و مکان دقیق آن تصمیم‌گیری شود. در این صورت اگر لبه‌های یک تصویر آشکار شوند، مکان تمام اشیاء برجسته و مات موجود در تصویر مشخص شده و خواص اساسی آن‌ها مانند سطح، محیط، ساختار شکلی، نوع و موقعیت اشیاء، تنها با پردازش نقاط محدودی از تصویر که لبه‌ها می‌باشند قابل اندازه‌گیری و تشخیص خواهد بود. در نتیجه استفاده از یک آشکارساز لبه دقیق، به افزایش نرخ بازشناسی ویژگی‌ها و قابلیت ناحیه‌بندی دقیق تصویر، به طور مستقیم کمک می‌کند [۲]. تاکنون روش‌های مختلفی برای لبه‌یابی معرفی و اجرا شده‌اند که می‌توان به دو گروه اصلی آشکارسازی لبه در مقیاس پیکسل و آشکارسازی لبه در مقیاس زیر پیکسل اشاره کرد [۳]. عملگرهایی مانند عملگر سوئل [۴]، عملگر پرویت [۵]، عملگر رابرتز [۶] و عملگر لاپلاسی [۷] که بر اساس مشتق‌گیری از تصویر در مقیاس پیکسل کار

۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



در این مقاله، آشکارسازی لبه با دقت زیرپیکسل بر اساس ممان سطح خاکستری [۱۰]، ممان مکانی [۱۱] و تقریب تابع خطا [۱۲] بررسی خواهد شد. ابتداء، مدل‌های لبه که یکی از اساسی‌ترین پارامترها برای آشکارسازی لبه است، معرفی می‌شود. سپس، توسط نرم‌افزار متلب نتایج شبیه‌سازی ارزیابی و مقایسه خواهد شد.

## ۲- مدل‌های لبه

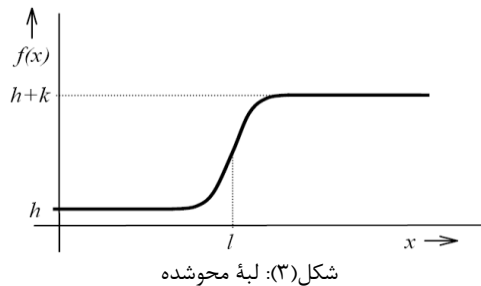
سومین مدل، به لبه واقعی در تصاویر نزدیکتر است. این مدل بر اساس محوشدگی تصویر تعریف می‌شود.

$$f(x) = \frac{k}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x-l}{\sqrt{2}\sigma} \right) + 1 \right] + h \quad (3)$$

$\operatorname{erf}(x)$  توسط رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (4)$$

این مدل نیز با چهار پارامتر شدت پس‌زمینه ( $h$ )، کنتراست لبه ( $k$ )، موقعیت لبه ( $l$ ) و ضریب محوشدگی لبه ( $\sigma$ )، مشخص می‌شود.



## ۳- آشکارسازی لبه با دقت زیرپیکسل

پس از معرفی مدل‌های لبه، سه روش آشکارساز لبه معرفی خواهد شد. طباطبایی و میشل ممان سطح خاکستری (Gray level moment) را پیشنهاد کردند. ممان‌های  $m_1$ ،  $m_2$  و  $m_3$  که دنباله‌ای از داده‌های ورودی هستند:

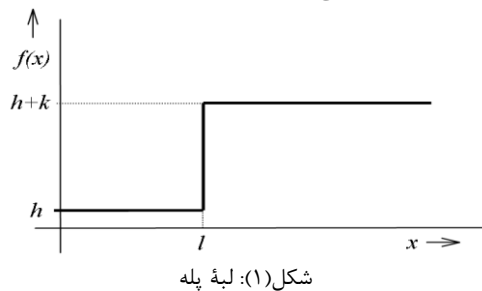
$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j^i \dots \dots i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

$x_1$ ،  $x_2$  و  $x_3$  نمونه‌های تصویر هستند. اگر آن‌ها را نمونه‌های لبه پله ایده‌آل (شکل ۱) و  $p_h$  را تعداد نمونه‌های سطح خاکستری فرض کنیم. آنگاه، برای به‌دست آوردن دقیق‌تر ممان‌های معرفی شده، می‌توان تعریف کرد:

برای تحلیل روش‌های آشکارسازی لبه و اثبات نتایج شبیه‌سازی، ابتدا به معرفی مدل‌های متداول لبه می‌پردازیم. در حالت کلی سه مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد. لبه پله ساده‌ترین مدلی است که توسط تابع پله تعیین می‌شود:

$$f(x) = \begin{cases} h, & x < l \\ h+k, & x \geq l \end{cases} \quad (1)$$

این مدل توسط سه پارامتر شدت پس‌زمینه ( $h$ )، کنتراست لبه ( $k$ ) و موقعیت لبه ( $l$ )، توصیف می‌شود.



در تصاویر واقعی درخشندگی به‌طور تدریجی تغییر می‌کند و لبه شیب پیشنهاد می‌شود.

$$f(x) = \begin{cases} h, & x < l_1 \\ h + \frac{k}{l_2 - l_1} (x - l_1) & l_1 \leq x < l_2 \\ h+k, & l_2 \leq x \end{cases} \quad (2)$$

لبه شیب با چهار مشخصه شدت پس‌زمینه ( $h$ )، کنتراست لبه ( $k$ )، ابتدای لبه ( $l_1$ ) و انتهای لبه ( $l_2$ ) تعریف می‌شود. موقعیت لبه ( $l$ ) با میانگین حسابی  $l_1$  و  $l_2$  برابر است.

حل روابط منجر به تولید سه مشخصه از لبه خواهد شد:

$$l = \frac{3M_2 - M_0}{2M_1} \quad (18)$$

$$k = \frac{2M_1}{(1-l^2)} \quad (19)$$

$$h = \frac{1}{2} [M_0 - k(1-l)] \quad (20)$$

در نهایت، آشکارسازی که در این مقایسه بررسی می‌شود بر اساس تقریبی از تابع حقیقی تصویر  $f_r(i)$  با تابع  $f_a(x)$  می‌باشد. به عبارت دیگر این روش از تخمین تابع خطا (approximation of erf function) برای آشکارسازی استفاده می‌کند:

$$f_a(x) = \frac{k}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x-l}{\sqrt{2}\sigma} \right) + 1 \right] + h \quad (21)$$

تابع  $f_a(x)$  با چهار پارامتر  $h$ ,  $k$ ,  $l$  و  $\sigma$  تعریف می‌شود. ایده اصلی این آشکارسازی لبه بر اساس حداقل مربعات برازش منحنی استوار است. بدین صورت که هدف کمینه کردن اختلاف بین تابع حقیقی تصویر  $f_r(i)$  و نمونه‌های تابع تقریب زده شده  $f_a(x)$  می‌باشد. این اختلاف توسط رابطه (۲۴) مشخص می‌شود:

$$E(h, k, l, \sigma) = \sum_{i=1}^N (f_r(i) - f_a(i))^2 \quad (22)$$

$N$  تعداد نمونه‌ها است. کمینه کردن اختلاف بین تابع حقیقی تصویر و نمونه‌های تابع تقریب زده شده، موقعیت لبه‌های زیرپیکسل را آشکار خواهد کرد. این روش از سه مرحله تشکیل می‌شود:

۱- آشکارسازی لبه با دقت پیکسل (استفاده از روش کنی)

۲- تخمین اولیه مقادیر  $(k_0, h_0, l_0, \sigma_0)$

۳- برازش، به وسیله حداقل کردن اختلاف تابع  $E(h, k, l, \sigma)$

در مرجع [۱۲] به طور کامل نحوه تخمین اولیه مقادیر بیان شده است. همچنین برای کمینه کردن اختلاف تابع  $E(h, k, l, \sigma)$  می‌توان از تابعی در متلب به نام  $fminsearch$  استفاده کرد.

#### ۴- نتایج شبیه‌سازی

برای مقایسه و انتخاب بهترین روش آشکارساز لبه با دقت زیرپیکسل از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. شبیه‌سازی، با فرض اینکه حسگرهای تصاویر (پیکسل‌ها) از عناصری با پهنای  $w$  و شکاف  $g$  تشکیل شده‌اند، انجام شده است.

$$p_1 = \frac{p_h}{n} \quad (6)$$

$$p_2 = \frac{n - p_h}{n} = 1 - p_1 \quad (7)$$

بازنویسی ممان‌ها:

$$m_1 = (1 - p_2) + p_2(h + k) \quad (8)$$

$$m_2 = (1 - p_2)h^2 + p_2(h + k)^2 \quad (9)$$

$$m_3 = (1 - p_2)h^3 + p_2(h + k)^3 \quad (10)$$

با استفاده از روابط بیان شده دو پارامتر لبه پله بر اساس ممان‌ها به دست می‌آید:

$$h = m_1 - \beta \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \quad (11)$$

$$k = 2\beta \sqrt{\frac{p_2}{p_1}} \quad (12)$$

$$\beta^2 = m_2 - m_1^2 \quad (13)$$

از دیگر آشکارسازهای لبه با دقت زیر پیکسل، ممان مکانی (Spatial moment) تابع پیوسته  $f(x)$  از مرتبه  $p$  است:

$$M_p = \int x^p f(x) dx \quad (14)$$

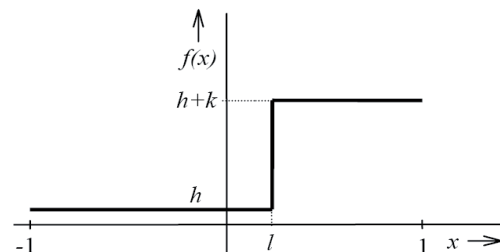
تابع  $f(x)$  توسط تابع پله شکل (۴) تعیین می‌شود.

همچنین بازه متغیر  $x$  [-1 1] می‌باشد. رابطه (۱۴) برای  $p = 0, 1, 2$  محاسبه شده است:

$$M_0 = 2h + k(1-l) \quad (15)$$

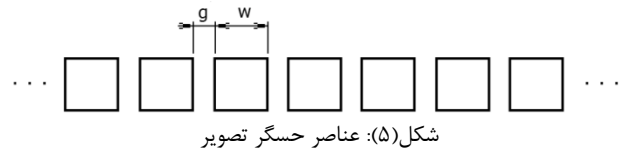
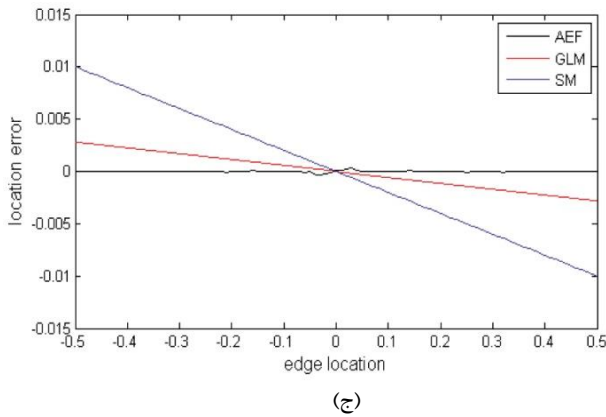
$$M_1 = \frac{1}{2} k(1-l^2) \quad (16)$$

$$M_3 = \frac{2}{3} h + \frac{1}{3} k(1-l^3) \quad (17)$$



شکل (۴): مدل لبه پله برای آشکارساز ممان مکانی

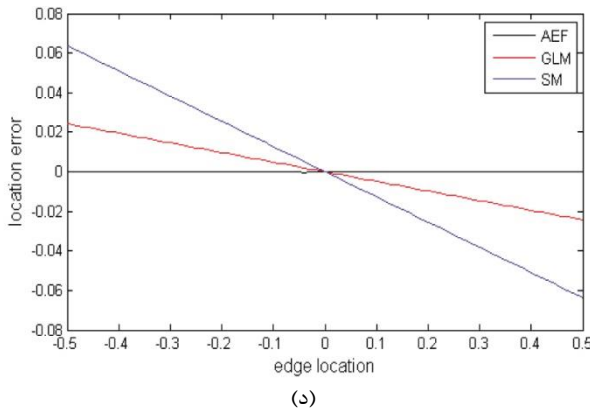
۲۰۲۱ آبان ماه ۱۳۹۴ - دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)



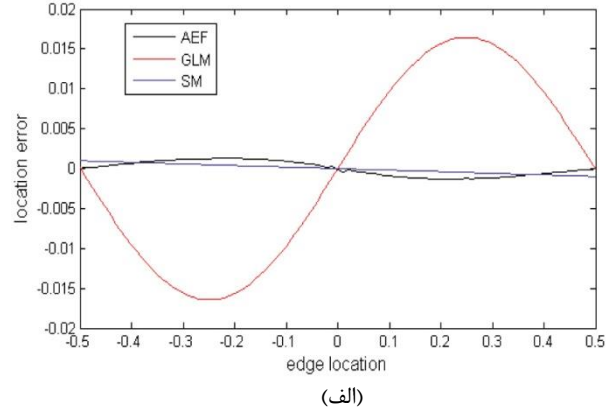
به دلیل اینکه مدل سوم به لبه واقعی در تصاویر نزدیک است، سیگنال خروجی مورد نظر ( $f_{rs}(i)$ ) برای شبیه‌سازی بر اساس این مدل، طبق رابطه (۲۵) تعریف می‌شود:

$$f_{rs}(i) = \alpha T_a \int_{i-w/2}^{i+w/2} \left( \frac{k}{2} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{x-l}{\sqrt{2}\sigma} \right) + 1 \right] + h \right) dx \quad (23)$$

$\alpha$  ضریب حساسیت پیکسل‌های تصویر است.  $T_a$  دوره تناوب سیگنال مورد نظر است. برای شبیه‌سازی می‌توان  $\alpha T_a = 1$  در نظر گرفت. به دلیل اینکه شکاف بین دو پیکسل بسیار کوچک است، می‌توان  $w = 1$  را فرض کرد. همچنین، برای شبیه‌سازی می‌توان  $k = 1$  و  $h = 0.1$  در نظر گرفت. ابتدا، شبیه‌سازی برای سیگنال بدون نویز اجرا شده است. شکل (۶) خطای موقعیت لبه را بر اساس موقعیت واقعی لبه برای مقادیر مختلف  $\sigma$  نشان می‌دهد.

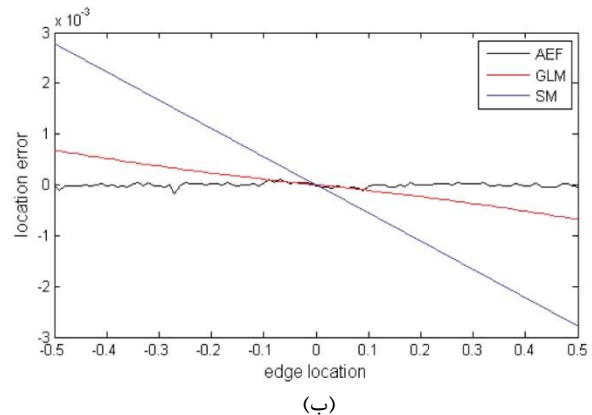


شکل (۶): خطای موقعیت لبه برای سیگنال بدون نویز بر اساس ضریب محوشدگی، الف ( $\sigma = 0.5$ ، ب ( $\sigma = 1$ ، ج ( $\sigma = 2$ ، د ( $\sigma = 5$ )



شکل (۶) ارتباط خطای موقعیت لبه را برای موقعیت واقعی لبه و مرکز پیکسل متناظر نشان می‌دهد. این ارتباط برای حالت‌های مختلف به دست آمده است. اگر مقدار  $\sigma = 0.5$  و  $\sigma = 1$  باشد، حالت تصویر (سیگنال) متمرکز (focused) می‌باشد و اگر مقدار  $\sigma = 2$  و  $\sigma = 5$  باشد، حالت تصویر نامتمرکز (unfocused) است. با توجه به شکل (۶)، دقت آشکارسازی برای مقادیر مختلف  $\sigma$  قابل ملاحظه است. استفاده از روش تقریب تابع خطا (AEF) در تمام حالت‌ها خطای کمتری دارد (خطا تقریباً صفر است).

اکنون، توسط تابع  $\operatorname{randn}$  سیگنال نویزدار می‌شود. سپس، خطای موقعیت لبه بر اساس مقادیر مختلف  $\sigma$  محاسبه می‌شود. همچنین، برای خطای موقعیت لبه، انحراف معیار (STD) متناظر مشخص شده است. با توجه به شکل (۷) و جدول (۱) می‌توان استنباط کرد که برای سیگنال نویزدار نیز روش‌های AEF و GLM خطای کمتری دارند.



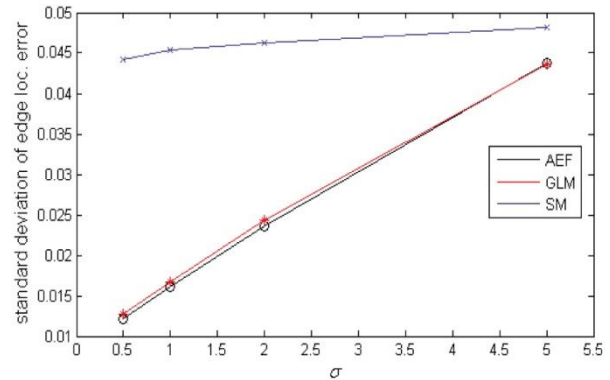
GLM	0.015	0.021	0.033	0.039
SM	0.040	0.044	0.052	0.057

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله سه روش آشکارساز لبه با دقت زیر پیکسل در شرایط واقعی و همچنین حالت های مختلف محوشدگی تصویر مقایسه و بررسی شد. می توان بر اساس شبیه سازی و آزمایش تصویر واقعی نتیجه گرفت که برای تصاویر متمرکز و نامتمرکز روش های AEF و GLM دقت آشکارسازی بالاتری دارند. برای کاربردهای عملی سیستم بینایی کامپیوتر مانند کالیبراسیون و بازسازی سه بعدی روش AEF به دلیل دقت بالا در آشکارسازی پیشنهاد می شود.

### مراجع

- [1] W. K. Pratt, *Digital Image Processing*, third edition, John Wiley and Sons, 2001.
- [2] T. Acharya, A. K. Ray, *Image Processing and Applications*. John Wiley and Sons, 2005.
- [3] I. Igbinosa, "Comparison of edge detection technique in image processing techniques," *International Journal of Information Technology and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 1, Feb. 2013.
- [4] I. E. Sobel, "Camera models and machine perception," *PhD. dissertation*, Stanford University, California, 1970.
- [5] B. S. Lipkin, A. Rosenfeld and J. M. S. Prewitt, "Object enhancement and extraction," in *Picture Processing and Psychopictorics*, New York : Academic Press, pp. 75-149, 1970.
- [6] L. G. Roberts, "Machine perception of three dimensional solids," in *Optical and Electro-Optical Information Processing*, Cambridge, MIT Press, pp. 159-197, 1965.
- [7] W. Xin, "Laplacian operator-based edge detectors," *IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 29, no. 5, pp. 886-890, May. 2007.
- [8] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 8, no. 1, pp. 679-697, 1986.
- [9] D. Marr, E. Hildreth, "Theory of edge detection," in *proc of Biological Sciences*, London, vol. 207, no. 1167, pp. 187-217, 1980
- [10] A. J. Tabatabai, O. R. Mitchell, "Edge location to subpixel values in digital imagery," *IEEE Transaction on Analysis and Machine Intelligence*, vol. 6, no. 2, pp. 188-201, 1984.
- [11] E. P. Lyvers, O. R. Mitchell, "Precision edge contrast and orientation estimation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, no. 6, pp. 927-937, 1988.
- [12] M. Hagara, P. Kulla, "Edge Detection with Sub-pixel Accuracy Based on Approximation of Edge with Erf Function," in *Radioengineering*, vol.20, no.2, pp. 516-524, 2011.



شکل (۷): انحراف معیار، بر اساس خطای موقعیت لبه برای سیگنال نویزدار

جدول (۱): انحراف معیار، بر اساس خطای موقعیت لبه برای سیگنال نویزدار

$\sigma$	0.5	1	2	5
AEF	0.012	0.015	0.023	0.042
GLM	0.013	0.016	0.024	0.043
SM	0.038	0.042	0.049	0.059

در این بخش، برای اثبات نتایج شبیه سازی، از تصاویر گرفته شده از یک میله استوانه ای استفاده شده است. در حالت فوکوس خودکار و حالت فوکوس دستی به تصاویری با مقادیر متفاوت  $\sigma$  دست خواهیم یافت. تصویر متمرکز و تصویر نامتمرکز در شکل (۸) مشخص شده است. همچنین، نتایج عددی در جدول (۲) نشان می دهد که روش های AEF و GLM دارای خطای کمتری در آشکارسازی لبه نسبت به روش SM هستند.



شکل (۸): (الف) تصویر اصلی، (ب) تصویر متمرکز، (ج) تصویر نامتمرکز

جدول (۲): انحراف معیار، بر اساس خطای لبه برای تصویر مورد آزمایش

$\sigma$	0.85	1.54	3.25	4.50
AEF	0.014	0.019	0.031	0.037