

## The Use of Industrial Radiography in Troubleshooting and Diagnosing the Structure of Electronic Boards for Reverse Engineering

Amir Movafeghi<sup>1</sup>  | Mahdi Mirzapour<sup>2</sup>  | Effat Yahaghi<sup>3</sup>  | Kosar Nomidi pirposhteh<sup>3</sup>   
 | Behrooz Rokrok<sup>1</sup> 

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Tehran, Iran.
2. Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
3. Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.  
E-mail: [k.nomidi@edu.ikiu.ac.ir](mailto:k.nomidi@edu.ikiu.ac.ir)

### Article Information:

#### Research Article

Received 24 July 2024

Revised 08 Sep. 2024

Accepted 09 Oct. 2024

#### Keywords:

Industrial Radiography,  
Reverse Engineering,  
Electronic Board,  
Modified Total  
Variation method,  
Image Processing.

### ABSTRACT

X-ray imaging of electronic boards is widely used in reverse engineering to identify circuits, their components and connections, and different damages. In this method, by passing the X-ray through single or multi-layer boards, the way they are connected and how the parts are arranged are determined. Investigations show that due to the scattering of X-rays and the thinness of the copper connections on the boards and the small dimensions of the electronic components, some amounts of blurriness and fogging are seen in the radiographs. In this research, to increase the contrast, the modified complete change method (MTV) has been used. MTV with alternating gradient is an iterative method based on gradient changes in complete changes. The results show that with the implementation of the MTV algorithm on the radiographs of different ranges, the contrast has increased and besides the copper connections have become clearer, the internal components of the electronic components have also become clearer. According to experts, about 20 to 40% contrast improvement can be seen in reconstructed images. This information can be used to repair or build boards in reverse engineering.

**Cite this article:** Movafeghi, A., Mirzapour, M., Yahaghi E., Nomidi pirposhteh, K., & Rokrok, B. (2024). The Use of Industrial Radiography in Troubleshooting and Diagnosing the Structure of Electronic Boards for Reverse Engineering. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 23-32.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.465284.1143>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

## کاربرد پرتونگاری صنعتی در عیب‌یابی و تشخیص ساختار بوردهای الکترونیکی برای مهندسی معکوس

امیر موافقی<sup>۱</sup> | مهدی میرزاپور<sup>۲</sup> | عفت یاحقی<sup>۲</sup> | کوثر نومیدی پیرپشته<sup>۳</sup> | بهروز رکرك<sup>۱</sup>

۱. پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.

۲. گروه ریاضی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران.

۳. گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: [k.nomidi@edu.ikiu.ac.ir](mailto:k.nomidi@edu.ikiu.ac.ir)

### چکیده:

پرتونگاری بوردهای الکترونیکی برای شناسایی مدارات، اجزاء آن، نحوه اتصالات و خرابی آنها و همچنین ساخت مجدد آنها، کاربرد زیادی در مهندسی معکوس دارد. در این روش با عبور پرتو ایکس از بوردهای یک یا چندلایه نحوه اتصالات و چگونگی چینش قطعات روی آنها مشخص می‌شوند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که به علت پراکندگی پرتو ایکس و ضخامت کم اتصالات مسی روی بوردها و همچنین ابعاد کوچک اجزای الکترونیکی در پرتونگاره‌ها مات شدگی وجود دارد و اجزای مورد کاملاً واضح نیستند. در این تحقیق برای بالا بردن کنتراست از روش تغییرات کامل اصلاح شده (MTV) با گرادیان متناوب که یک روش تکراری بر اساس تغییرات گرادیان در تغییرات کامل است، استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد با اجرای الگوریتم MTV روی پرتونگاره‌های بوردهای مختلف کنتراست افزایش یافته و علاوه بر مشخص‌تر شدن اتصالات مسی، اجزای داخلی قطعات الکترونیکی نیز واضح‌تر شده‌اند. از نظر متخصصین در تصاویر بازسازی شده حدود ۲۰ تا ۴۰٪ بهبود کنتراست دیده می‌شود. این اطلاعات می‌تواند در تعمیر و یا ساخت بوردها در مهندسی معکوس استفاده شود.

### اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۰۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۷/۱۸

### کلیدواژگان:

پرتونگاری صنعتی،

مهندسی معکوس،

بوردهای الکترونیکی،

روش تغییرات کامل اصلاح

شده،

پردازش تصویر.

استناد: موافقی، امیر؛ میرزاپور، مهدی؛ یاحقی، عفت؛ نومیدی پیرپشته، کوثر و رکرك، بهروز. (۱۴۰۲). کاربرد پرتونگاری صنعتی در عیب‌یابی و تشخیص ساختار بوردهای الکترونیکی برای مهندسی معکوس. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۲۳-۳۲.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.465284.1143>



## ۱- مقدمه

بوردهای الکترونیکی و مدارات مجتمع<sup>۳</sup>، IC [۵] توسعه داده‌اند. بطور کلی روش‌های عیب‌یابی مورد نیاز باید غیر مخرب باشد و آسیب ثانویه به مورد وارد نشود [۶-۷]. فو و همکارانش [۸] از روش توموگرافی کامپیوتری برای ارزیابی و بررسی چگونگی ساخت بوردها استفاده کرده‌اند. در حال حاضر روش پرتونگاری نیز یکی از روش‌های مرسوم برای عیب‌یابی بوردهای الکترونیکی است [۹]. روش‌های پردازش تصویر مانند شبکه عصبی و مشتقات آن و افزایش کنتراست تصاویر دو بعدی و سه بعدی که اطلاعات مختلفی را در مورد بوردهای الکترونیکی می‌دهند در این حیطه کاربردهای زیادی دارند [۱۰-۱۱].

در بسیاری از موارد در تجهیزات الکترونیکی نیاز به ساخت یک مورد مشابه و عیب‌یابی یک مورد مد نظر است که طرح و نقشه آن به دلایل قدیمی بودن دستگاه و یا انحصاری بودن دستگاه موجود نمی‌باشد، در این حالت می‌توان با مهندسی معکوس به اطلاعاتی در مورد مدار دست پیدا کرد و یک دستگاه، قطعه یا محصول مشابه از روی نمونه اولیه ساخت. باید دقت شود که استفاده از این روش در موارد خاص مانند صنایع نظامی و صنایع سنگین توجیه اقتصادی دارد.

برای بدست آوردن اطلاعات مورد نیاز می‌توان از نرم‌افزارهای مخصوص استخراج اطلاعات و پرتونگاری استفاده کرد. این نرم‌افزارها، به کاربران کمک می‌کند که مدل سه بعدی قطعات را به صورت مجزا یا در یک مجموعه مشاهده کنند و قبل از شروع فرایند ساخت، بتوانند ایرادها و اشکالات احتمالی را رفع کنند. با توجه به ورودی و خروجی‌های سیستم می‌توان اطلاعات لازم برای ساخت مدل سه بعدی را بدست آورد [۶].

یکی دیگر از روش‌های مهم در شناسایی اجزای مورد پرتونگاری است. پرتونگاری قابلیت خوبی برای نحوه شناخت اتصالات اجزای مدار دارد [۳]. همچنین با این روش اطلاعاتی در مورد عیوبی مانند لحیم کاری پل‌ها، قطعی سیم، اتصالات کوتاه، فقدان لحیم کاری در اتصالات، ترک خوردگی، و در بعضی موارد خرابی داخل قطعه قابل حصول هستند [۳].

در پرتونگاری از یک تیوب اشعه ایکس استفاده می‌شود که پرتو آن از جسم عبور کرده و بر روی آشکارساز که می‌تواند فیلم رادیوگرافی و یا صفحات فسفری و یا آشکارسازهای دیجیتال باشد، ظاهر می‌شود. تضعیف اشعه ایکس که به ضخامت و ضریب تضعیف مواد دارد، باعث تضعیف پرتو شده و مقدار پرتو ایکس

بوردهای الکترونیکی مجموعه‌ای از قطعات و اجزای الکترونیکی نظیر آی سی‌ها، خازن‌ها، ترانزیستورها و مقاومت‌ها تشکیل می‌شوند که بر روی یک مورد سوار شده و کاربردهای مختلفی مانند کنترل سیستم‌ها و تقویت‌کنندگی در مدارات الکترونیکی را انجام می‌دهند. این بوردها بیشتر در صنایع الکترونیکی، صنایع سنگین، خودروسازی و لوازم خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. ساخت مدارهایی با مورد چاپی نسبت به سیم‌کشی ارزان‌تر و سریع‌تر است و خطاهای ناشی از اشتباهات سیم‌بندی اپراتور هم در این روش حذف می‌شود. بوردها در مباحث الکترونیکی با عنوان مورد مدارهای چاپی<sup>۱</sup> PCB شناخته می‌شود که با رنگ‌های سبز، نارنجی و آبی در بازار موجود هستند. این بوردها بر اساس ساختار و نوع کاربرد می‌توانند تک لایه (یک رو)، دولایه (دو رو) و چند لایه<sup>۲</sup> برای صنایع مختلف ساخته شوند [۱]. مورد یک رو برای طراحی و تولید وسایل برقی و الکتریکی ساده کاربرد فراوانی دارد. همچنین، ماده اولیه در تولید بوردهای خام معمولاً فایبرگلاس است. در فایبر مدار چاپی یک لایه، کلیه قطعات و متعلقات الکتریکی در یک طرف PCB سوار می‌شوند. در بوردهای دولایه، لایه نازک مسی در هر دو طرف فایبر به چشم می‌خورد و برخلاف بوردهای یک لایه قابلیت مونتاژ قطعات الکترونیکی در هر دو طرف مورد وجود دارد. در ساختار مدار چاپی چند لایه، بیشتر از دولایه مس وجود دارد. اتصال لایه‌های رسانا به یکدیگر در مورد الکترونیکی چندلایه، از طریق سوراخ‌های موجود بر روی مورد (جامپرها) انجام می‌گیرد. این مدل از انواع مورد الکترونیکی به لحاظ برخورداری از پیچیدگی‌های زیاد و قیمت بالاتر، در لوازم الکترونیکی پیشرفته به کار می‌رود [۱].

برای عیب‌یابی مورد، روش‌های متعدد غیر مخرب وجود دارد. لو و همکارانش [۲] با استفاده از ترموگرافی و روش پردازش تصویر بر مبنای متوسط‌گیری حباب‌های لحیم‌ها را بررسی کرده‌اند. لیو و همکارانش با استفاده از روش‌های ارتعاشی [۳] و لیزر صوتی [۴] خرابی‌های ناشی از لحیم کاری را بررسی کرده‌اند. هانگ و همکاران روش‌های بینایی ماشین را برای عیب‌یابی در

<sup>3</sup> Integrated Circuit

<sup>1</sup> Printed Circuit Board

<sup>2</sup> Multi-layer PCB

خاص آنها صورت گرفته است. برای برد اصلی کامپیوتری دو ولتاژ ۴۰ kV و ۱۴۰ kV استفاده شده که تفاوت تصاویر رادیوگرافی در انرژی پایین و بالا بر حسب انرژی انتخابی روی پرتونگاری بررسی شود. برد موبایل از سایت مکروموس [۱۹] انتخاب شده و مشخصات پرتونگاری آن مشخص نیست. هدف از انتخاب این تصویر رادیوگرافی بررسی کارآئی روش بر روی سایر تصاویر بردهای الکترونیکی می باشد.

جدول ۱) مشخصات پرتونگاری بردهای مدار چاپی

ولتاژ (کیلو ولت)	جریان (میلی آمپر)	زمان (دقیقه)	
۹۰	۲	۳	برد تک لایه
۱۴۰	۴	۲	برد چند لایه کامپیوتر
۴۰	۴	۵	برد چند لایه کامپیوتر
-	-	-	تلفن همراه- برد چند لایه

روی آشکارساز را تغییر می دهد و نقاطی در فیلم تاریک تر یا روشن تر دیده می شوند [۸].

در پرتونگاری بصورت ذاتی پراکندگی پرتو ایکس وجود دارد. بخاطر پراکندگی ایکس، عملیات ظهور و ثبوت در پرتونگاری سنتی که با فیلم انجام می شود و نویزهای الکترونیکی در سیستم های دیجیتال تصاویر پرتونگاری غالباً مات شدگی و تباین یا کنتراست کمی دارند [۱۲-۱۳].

به منظور کاهش پراکندگی که باعث مات شدگی تصویر می شود، از صافی های خاص که در پردازش تصویر کاربرد دارند و می توانند تا حدی نویز سیستم را کم کنند؛ استفاده می شود. این فیلترها در حوزه های مکان و زمان بکار می روند. یکی از روش های مهم روش تغییرات کل است که برای حداقل کردن آن از روش های مختلف نورم ۱ و ۲ استفاده شده است [۱۴-۱۶].

در این تحقیق ساختار داخلی و عیوب احتمالی بردهای مختلف تلفن همراه و بردهای الکترونیکی با پرتونگاری بررسی شده است. از روش تغییرات کامل اصلاح شده استفاده شده تا تباین پرتونگاره ها بهبود یابد و ساختار بوردها جهت استخراج اطلاعات برای مهندسی معکوس و شناسایی عیوب احتمالی، بهتر شناسایی شود.

## ۲-۲ الگوریتم تغییرات کامل اصلاح شده (MTV<sup>۴</sup>) با گرادینان متناوب

در این مقاله به منظور بهبود کیفیت تصاویر بردهای الکترونیکی و افزایش کنتراست آنها از روش حذف پس زمینه مبتنی بر یک مدل وردش تعمیم یافته بهره می گیریم. برای این منظور ابتدا یک مدل نویززدایی که شامل تابع وردش تعمیم یافته است را حل نموده و سپس جواب حاصل را از تصویر داده شده تفریق نموده تا تصویر با کیفیت حاصل شود. ابتدا با تعریف تابع وردش و نسخه تعمیم یافته آن شروع می کنیم.

تابع وردش (TV) برای اولین بار توسط رودین، اوشر و فاطمی برای کاهش نویز و بهبود کیفیت تصاویر پیشنهاد شد [۱۹]. حالت گسسته تابع TV بصورت زیر تعریف می شود:

$$TV(x) = \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \sqrt{(x[n_1+1, n_2] - x[n_1, n_2])^2 - (x[n_1, n_2+1] - x[n_1, n_2])^2}$$

## ۲- روش کار

### ۲-۱ پرتونگاری

برای پرتونگاری بردهای الکترونیکی، مقدار ولتاژ دستگاه پرتونگاری در ۴۰، ۹۰ و ۱۴۰ kV تنظیم شده و از سیستم CR برای ثبت پرتوهای عبوری استفاده شده است. جریان بین ۲ تا ۴ میلی آمپر و زمان پرتو دهی بین ۲ تا ۵ دقیقه انتخاب شده است (mA.min#4~20) و فاصله منبع از آشکارساز ۱۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. از یک صفحه سربی در زیر آشکارساز برای کم کردن اثر پس پراکندگی پرتوها از زمین استفاده شده است. در تمام آزمون های پرتونگاری از استانداردهای جهانی برای تکرارپذیری آزمایشات استفاده شده است [۱۷-۱۸].

در این تحقیق از پرتونگاره های ۴ برد الکترونیکی چند لایه مربوط به یک کامپیوتر و یک سیستم مبدل و برد چند لایه یک موبایل استفاده است. مشخصات پرتونگاری در جدول ۱ آورده شده است. انتخاب بوردها بر اساس پیچیدگی و کاربرد

<sup>4</sup> Modified Total Variation

همچنین فرض کنید ".\*" بیانگر عملگر الحاقی باشد. در

(۱)

اینصورت MTV بصورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$MTV(x) = \min_{v_{\uparrow}, v_{\leftrightarrow}, v_{\leftarrow} \in (\mathbb{R}^2)^{N_1 \times N_2}} \{ \|v_{\uparrow}\|_{1,2} + \|v_{\leftrightarrow}\|_{1,2} + \|v_{\leftarrow}\|_{1,2} : L_{\uparrow}^* v_{\uparrow} + L_{\leftrightarrow}^* v_{\leftrightarrow} + L_{\leftarrow}^* v_{\leftarrow} = Dx \}, \quad (5)$$

که در آن فضاهای برداری  $v_{\uparrow}$ ,  $v_{\leftrightarrow}$  و  $v_{\leftarrow}$  جواب (یا یکی از جوابهای ممکن) مساله در رابطه (۵) هستند. باید توجه داشت که عناصر  $v_{\uparrow}$ ,  $v_{\leftrightarrow}$  و  $v_{\leftarrow}$  بردارهایی در فضای  $\mathbb{R}^2$  می‌باشند. همچنین فضای جواب مساله (۵) ناتهی است و می‌توان حداقل یک جواب برای آن یافت.

حال مساله برای بهینه‌سازی زیر، که مبتنی بر MTV تعریف

شده در رابطه (۵) می‌باشد، را در نظر می‌گیریم

$$\bar{x} = \operatorname{argmin}_{x \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2}} \left\{ \frac{1}{2} \|x - y\| + \lambda MTV(x) \right\}. \quad (6)$$

برای حل مساله بهینه‌سازی غیرخطی (۶) روش‌های مختلفی وجود دارد اما روش تقریب گرادیان متناوب [۲۰] یک روش تکراری کارآمد برای حل مساله (۶) می‌باشد. این روش مبتنی بر تقریب متناوب گرادیان‌های دو تابع  $F(x) = \frac{1}{2} \|x - y\|$  و  $G(x) = \lambda MTV(x)$  می‌باشد. این تقریب‌ها برای پارامتر دلخواه  $\alpha > 0$  و هر پیکسل دلخواه  $[n_1, n_2]$  بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$Prox_{\alpha F}(y) = \frac{(x + \alpha y)}{1 + \alpha}, \quad (7)$$

$$(Prox_{\alpha G}(v))_c[n_1, n_2] = v_c[n_1, n_2] - \frac{v_c[n_1, n_2]}{\max(\frac{|v_c[n_1, n_2]|}{\alpha \lambda}, 1)}, \quad \forall c \in \{\uparrow, \leftrightarrow, \leftarrow\}. \quad (8)$$

بنابراین، با قراردادن  $Cv = -(L_{\uparrow}^* v_{\uparrow} + L_{\leftrightarrow}^* v_{\leftrightarrow} + L_{\leftarrow}^* v_{\leftarrow})$  انتخاب پارامترهای  $0 < \tau < 1/8$ ،  $0 < \gamma < 1/3$  و  $\mu > 0$  و با تخمین بردارهای شروع  $x^{(0)}$  و  $v^{(0)}$  و برای  $i = 0, 1, 2, \dots$  تکرارهای الگوریتم تقریب گرادیان متناوب برای حل مساله (۶) بصورت زیر است:

که در آن  $x \in \mathbb{R}^{N_1 \times N_2}$  یک تصویر است و  $n_1$  و  $n_2$  مشخصات مکانی پیکسل‌ها را نشان می‌دهند. تابع TV در رابطه (۱) در کنار قابلیت کاهش نویز و افزایش وضوح لبه‌ها در تصویر، در شناسایی و حفظ خطوط و لبه‌های اریب (نه افقی و نه عمودی) ضعف داشته و باعث بلوری شدن این خطوط می‌شود. همچنین در صورت چرخش تصویر در زاویه‌های دلخواه، مقدار TV ثابت باقی نخواهد ماند. علاوه بر این مقدار عددی پیکسل‌های ایزوله بصورت معناداری کمتر از مقدار واقعی تخمین زده می‌شوند. برای غلبه بر این کاستی، نسخه‌های مختلفی از تابع TV پیشنهاد شده است، بطور مثال مراجع [۱۶-۱۴] را ببینید. در این مقاله، مشابه با [۱۶] یک نسخه تغییرات کامل اصلاح شده (MTV) استفاده شده است. برای این منظور نیاز به تعریف برخی از نمادها داریم. فرض کنید  $Dx \in (\mathbb{R}^2)^{N_1 \times N_2}$  بیانگر عملگر تفاضل پیکسل‌ها بوده و بصورت زیر تعریف شود:

$$(Dx)_1[n_1, n_2] = x[n_1 + 1, n_2] - x[n_1, n_2] \quad (2)$$

$$(Dx)_2[n_1, n_2] = x[n_1, n_2 + 1] - x[n_1, n_2] \quad (3)$$

همچنین فرض کنید نمادهای  $L_{\uparrow}$ ،  $L_{\leftrightarrow}$  و  $L_{\leftarrow}$  بیانگر عملگرهای درون‌یابی دوخطی بوده که بر روی درایه‌های دوگان تصویر  $x$  یعنی زوج تصویر  $u = (u_1, u_2)$  بصورت زیر عمل می‌کنند:

$$\left\{ \begin{array}{l} (L_{\uparrow}u)_1[n_1, n_2] = u_1[n_1, n_2], \\ (L_{\uparrow}u)_2[n_1, n_2] = (u_2[n_1, n_2] + u_2[n_1, n_2 - 1] + u_2[n_1 + 1, n_2] + u_2[n_1 + 1, n_2 - 1])/4, \\ (L_{\leftrightarrow}u)_1[n_1, n_2] = (u_1[n_1, n_2] + u_1[n_1 - 1, n_2] + u_1[n_1, n_2 + 1] + u_1[n_1 - 1, n_2 + 1])/4, \\ (L_{\leftrightarrow}u)_2[n_1, n_2] = u_2[n_1, n_2], \\ (L.u)_1[n_1, n_2] = (u_1[n_1, n_2] + u_1[n_1 - 1, n_2])/2, \\ (L.u)_2[n_1, n_2] = (u_2[n_1, n_2] + u_2[n_1, n_2 - 1])/2. \end{array} \right.$$

(۴)

IC ها و اتصالات فلزی آنها ( نشانگر ۲ و ۳ )، و داخل مقاومتها ( نشانگر ۵ ) در تصویر پردازش شده شکل ۱-ب واضح تر دیده می شوند. اطلاعات بدست آمده بخصوص در نحوه اتصالات پایهها برای پیاده سازی مدار جهت مهندسی معکوس مفید است.

برای بررسی تاثیر مقدار ولتاژ از یک بورد کامپیوتر با دو ولتاژ ۱۴۰ kV و ۴۰ kV پرتونگاره تهیه شد. در شکل ۲-الف و ج پرتونگاره یک بورد کامپیوتری با دو تنظیم مختلف ولتاژ پرتونگاری برای دو ولتاژ ۱۴۰ kV ( شکل ۲-الف ) و ۴۰ kV ( شکل ۲-ج ) نشان داده شده اند. مقایسه دو پرتونگاره ۲-الف و ج نشان می دهند که انتخاب ولتاژ در آشکارسازی قطعات تاثیر زیادی دارد. هر چند شکل ۲-الف تیره تر از شکل ۲-ج بنظر می رسد ولی قطعات و اجزای آنها بخصوص در ناحیه پردازنده اصلی در شکل ۲-الف واضح تر است. در شکل ۲-الف ( نشانگر ۱ ) محل پردازنده اصلی مشخص شده است. مقایسه این ناحیه با محل پردازنده در شکل ۲-ج ( نشانگر ۱ ) نشان می دهد که بخاطر کم بودن انرژی تصویر برداری اجزای پردازنده در این شکل مشخص نیستند.

در دو شکل ۲-ب و د تصاویر بازسازی شده پرتونگاره های دو شکل الف و ج دیده می شوند. مقایسه تصاویر بازسازی شده با پرتونگاره های اصلی نشان می دهند که اجزای مدار مانند پردازشگر اصلی ( نشانگر ۱ )، اسلات های حافظه ( نشانگر ۲ )، پل های بورد اصلی ( نشانگر ۳ ) و سایر اجزای بورد در شکل ۲-ب بهتر از شکل ۲-الف دیده می شوند. در تصویر بازسازی شده شکل ۲-ب مشخصات داخل پردازشگر اصلی ( نشانگر ۱ ) بخوبی دیده می شوند ولی در این تصویر اتصالات مسی روی بورد اصلی بسختی قابل تشخیص هستند. در شکل ۲-د اگر چه مشخصات پردازشگر اصلی دیده نمی شود ولی اتصالات مسی روی بورد ( نشانگر ۴ ) مشخص هستند. پردازشگر اصلی شامل نیمه هادی با لایه پلاستیکی است که در داخل آن اتصالات فلزی برای ارسال سیگنال ها وجود دارد با زیاد شدن انرژی، پرتو ایکس بیشتر نفوذ کرده و اطلاعات داخل پردازشگر نشان داده می شود.

$$\begin{cases} x^{(i+1)} := \text{Prox}_{\mu\tau F} \left( x^{(i)} - \tau D^* \left( C v^{(i)} + \mu u^{(i)} \right) \right), \\ v^{(i+1)} := \text{Prox}_{\gamma\mu G} \left( \tau C^* \left( D x^{(i+1)} + C v^{(i)} + \mu u^{(i)} \right) \right), \\ u^{(i+1)} := u^{(i)} + \frac{D x^{(i+1)} + C v^{(i+1)}}{\mu}. \end{cases} \quad (9)$$

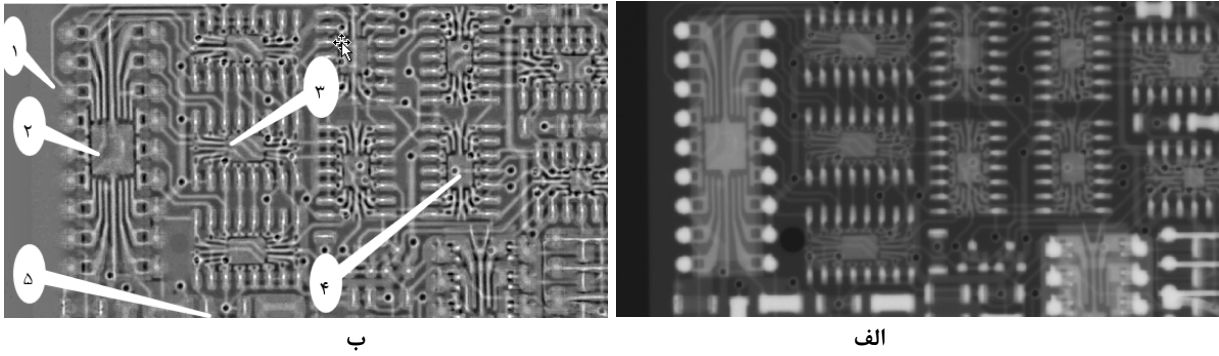
نشان داده شده است که تکرارهای  $x^{(i)}$  در نهایت به جواب  $\bar{x}$  همگرا می شوند [۲۱-۲۲]. حال با تفریق پس زمینه  $\bar{x}$  از تصویر داده شده  $y$ ، تصویر کیفیت و با کنتراست بالاتر  $\hat{x}$  بدست می آید، در واقع خواهیم داشت:

$$\hat{x} = y - \bar{x}. \quad (10)$$

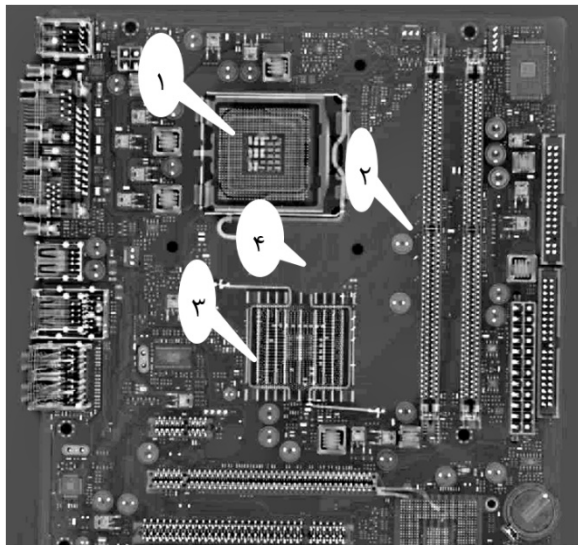
در قسمت بعد نتایج اجرای الگوریتم حذف پس زمینه مبتنی بر MTV آورده شده است.

### ۲-۳ نتایج

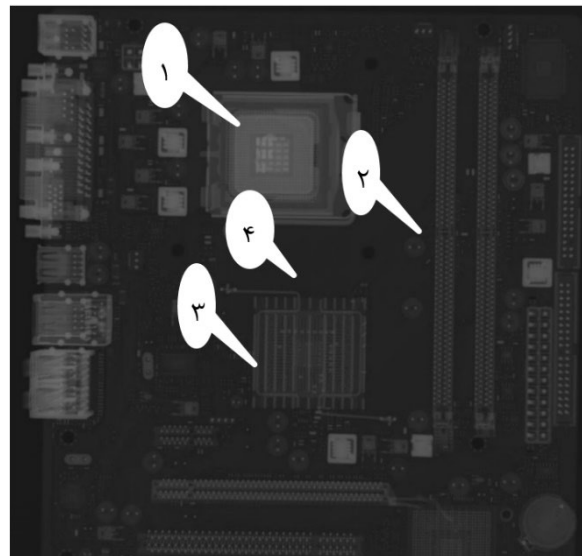
در این تحقیق برای شناسایی مدارات چاپی و اجزای بوردها به منظور استخراج اطلاعات برای مهندسی معکوس از پرتونگاری استفاده شده است. با توجه به تباین کم تصاویر از روش MTV استفاده شده است. ابتدا تصاویر پرتونگاری مطابق بخش ۱.۲ تهیه شده و سپس با برنامه ی نوشته شده در نرم افزار متلب ۲۰۱۸ باز و با الگوریتم مورد نظر پردازش شده اند در شکل ۱ تصویر یک بورد الکترونیکی تک لایه که شامل IC های مختلف است نشان داده شده است. پایه های IC ها و قسمت نیمه هادی و نحوه اتصالات پایه ها در پرتونگاره مشهود است. برای پردازش پرتونگاره ها با توجه به مرجع [۱۶]،  $\mu$ ،  $\lambda$  و  $\tau$  به ترتیب ۰/۱۵، ۱ و ۰/۱۶ در نظر گرفته شده و تعداد تکرار ۱۰۰۰ تا بوده است. در پرتونگاره یک بورد یک طرفه شامل مدارات IC و در شکل ۱-ب تصویر پردازش شده آن نشان داده شده است. مقایسه دو شکل نشان می دهد که علاوه بر اتصالات سیم های مسی که در پرتونگاره اصلی ( شکل ۱-الف ) بسختی دیده می شوند نقاط لحیم کاری روی سوراخ ها ( نشانگر ۱ )، ناحیه نیمه هادی داخل



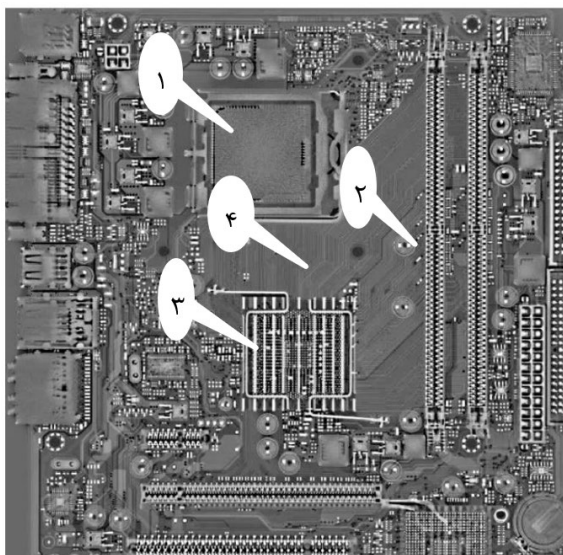
شکل (۱) الف - پرتونگاره اصلی یک بورد چند لایه شامل IC، ب- تصویر پرداز شده بورد



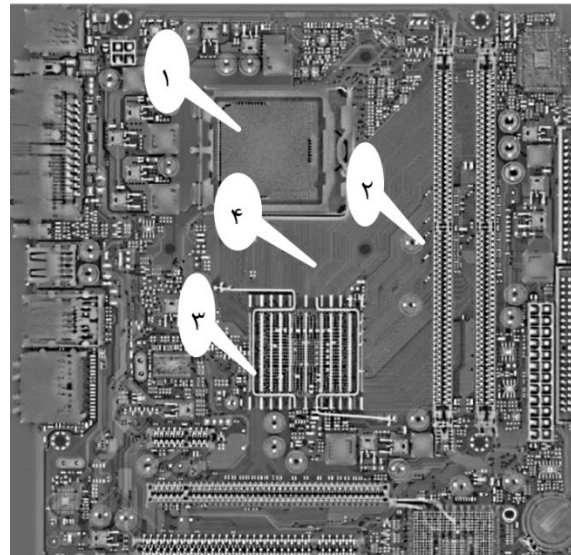
ب



الف

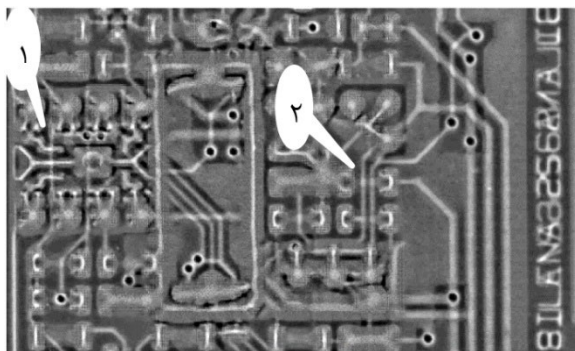


د



ج

شکل (۲) الف- پرتونگاره بورد اصلی کامپیوتر با ولتاژ  $14\text{ kV}$ ، ب- تصویر بازسازی شده آن، ج- پرتونگاره بورد اصلی کامپیوتر با ولتاژ  $40\text{ kV}$ ، د- تصویر بازسازی شده آن

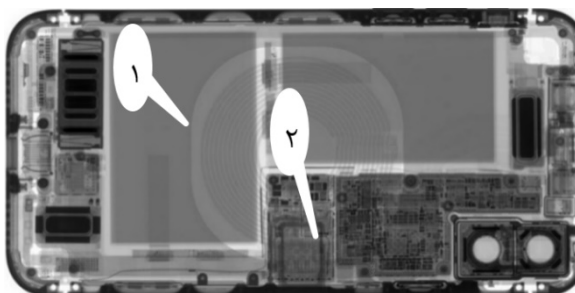


ب

شکل ۳) برد دولایه: الف پرتونگاره اصلی ب- تصویر بازسازی آن

در شکل ۴-الف پرتونگاره یک تلفن همراه نشان داده شده که اجزای داخلی آن مانند آنتن حلقوی (نشانگر ۱) و برد الکترونیکی (نشانگر ۲) روی تصویر مشخص هستند. در تصویر بازسازی شده هر چند این اجزا مشخص‌تر هستند، ولی به دلیل کوچک بودن اجزا و اتصالات زیاد تشخیص همه اتصالات آسان نیست.

اجرای الگوریتم روش شبه نرم تغییرات کل برای یک تصویر با ابعاد ۸۲۰ در ۱۳۲۰ در حدود ۲۴ ثانیه با یک پردازنده Core(TM) i9 و ۲/۵GHz با ۱۶ GB حافظه حدود ۲۴ ثانیه طول می‌کشد. ولی با توجه به اینکه اطلاعات پردازشی بصورت مستقیم استفاده نمی‌شود و ترکیبی از اطلاعات استخراج شده از روش‌های مختلف نرم‌افزاری و پرتونگاری است، طولانی بودن زمان پردازش مشکلی در روند مهندسی معکوس بوجود نمی‌آورد.

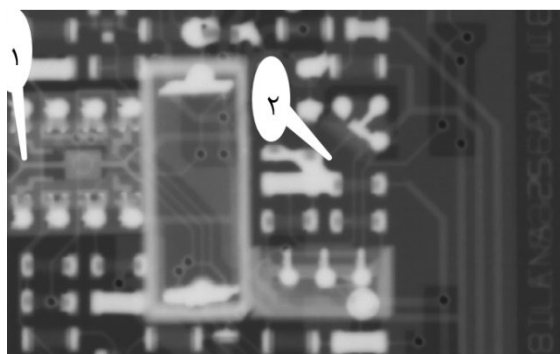


الف

سیم‌های مسی هرچند عدد اتمی مناسبی برای تضعیف پرتو ایکس دارند ولی بخاطر ضخامت کم در تصویر دیده نمی‌شوند. با کم شدن انرژی این لایه‌های مسی قابل مشاهده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد که با توجه به جنس و ضخامت اجزای تشکیل دهنده بوردها گاهی استفاده از دو انرژی متفاوت می‌تواند اطلاعات مفیدی در جهت مهندسی معکوس در اختیار کاربر قرار دهد.

در شکل ۳-الف و ب پرتونگاره یک برد دولایه و تصویر بازسازی شده آن نشان داده شده است. اجزای داخلی IC و سیم‌های اتصالی آن در شکل بخوبی دیده می‌شوند (نشانگر ۱). همچنین مقاومت‌ها و سایر اجزای برد نیز بخوبی مشخص هستند، در تصویر بازسازی شده هم اتصالات لحیم کاری و بین‌های قطعات واضح‌تر دیده می‌شوند. بررسی شکل ۳-الف نشان می‌دهد که خطوط مسی در رو و پشت برد این خطوط وجود دارند (نشانگر ۲). خطوط مسی روی برد روشن‌تر از خطوط مسی پشت برد دیده می‌شوند. در تصویر بازسازی شده هر چند خطوط مسی واضح‌تر شده‌اند، ولی به دلیل افزایش کنتراست تشخیص اینکه کدام اتصال مربوط به روی و پشت برد، مشکل است. بنابراین هنگام کار با این الگوریتم لازم است که تصویر پرتونگاره اصلی و بازسازی شده همزمان بررسی شوند تا اشتباهی صورت نگیرد.



الف

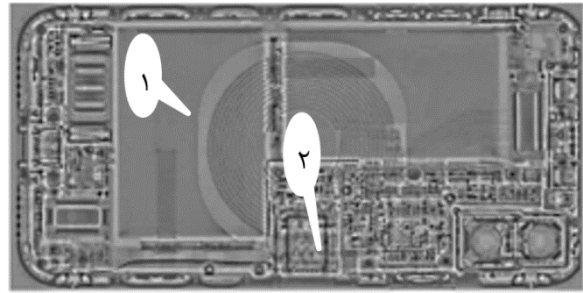
در جهت مهندسی معکوس استفاده شده است. پرتونگاره‌های تهیه شده به روش CR اطلاعات مناسبی را در اختیار کارشناسان مهندسی معکوس قرار می‌دهد تا اتصالات و اجزای بوردها را بخوبی شناسایی کنند. در این تحقیق با بهبود تباین پرتونگاره‌ها قسمتی از اطلاعات پرتونگاره‌ها که می‌تواند به مهندسی معکوس کمک کنند، واضح‌تر می‌شود. استفاده همزمان تصاویر بازسازی شده و پرتونگاره‌های اصلی اطلاعات مناسبی در مورد نحوه اتصالات، اجزای الکترونیکی مورد، نحوه لحیم کاری، محل سوراخ‌های روی برد و خرابی و قطع شدگی‌های اتصالات مسی را می‌دهد. ارزیابی متخصصین بر بهبود کنتراست و استخراج بهتر اطلاعات تاکید دارد.

#### ۴- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

#### ۵- منابع

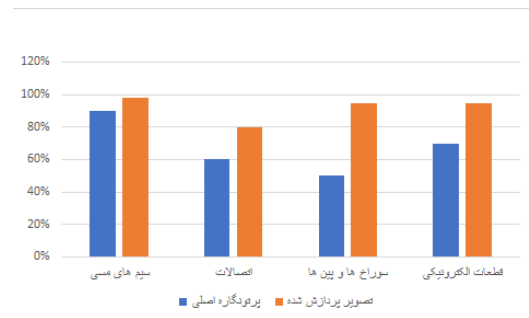
- [1] Azin, A., Zhukov, A., Narikovich, A., Ponomarev, S., Rikkonen, S., & Leitsin, V. (2018). Nondestructive testing method for a new generation of electronics. MATEC Web of Conferences, 143, 04007. YSSIP-2017.
- [2] Lu, X., He, Z., Su, L., Fan, M., Liu, F., Liao, G., & Shi, T. (2018). Detection of micro solder balls using active thermography technology and k-means algorithm. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(12), 5620–5628.
- [3] Liu, S., & Ume, I.C. (2002). Vibration analysis based modeling and defect recognition for flip-chip solder-joint inspection. Journal of Electronic Packaging, 124, 221–226.
- [4] Liu, S., Erdahl, D., Ume, C., & Achari, A. (2000). A novel method and device for solder joint quality inspection by using laser ultrasound. \*Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, USA, 408–415.
- [5] Huang, C.Y., Hong, J.H., & Huang, E. (2019). Developing a machine vision inspection system for electronics failure analysis. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 9(9), 1912–1925.



ب

شکل ۴) تلفن همراه: الف پرتونگاره اصلی ب- تصویر بازسازی آن

برای ارزیابی نتایج از نظرات پنج متخصص پرتونگاری و ۳ متخصص مهندسی معکوس استفاده شد. در این نظر سنجی از آنها خواسته شد که با مقایسه پرتونگاره اصلی و تصویر پردازش شده به اجزای تصویر امتیازی بین ۱ تا ۱۰ بدهند. نتایج این امتیازدهی در شکل ۵ آورده شده است.



شکل ۵) نتایج ارزیابی متخصصین

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد که تصاویر پردازش شده سیم‌های مسی، اتصالات، محل پین‌ها و اجزای الکترونیکی را مشخص‌تر کرده و بهبود کنتراست مناسبی در این نواحی دیده می‌شود. سیم‌های مسی با حدود ۹۸٪ و ۸۵٪ و اتصالات با ۸۰٪ و ۶۰٪ امتیاز به ترتیب در تصاویر بازسازی شده و پرتونگاره‌ها هستند. بطور نسبی بهبود حدود ۲۰٪ تا ۴۰٪ در تصاویر بازسازی شده دیده می‌شود.

#### ۳- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش MTV برای ارتقا کنتراست پرتونگاره‌های بوردهای الکترونیکی جهت استخراج اطلاعات

- Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 60(1-4), 259-268.
- [15] Chambolle, A., Levine, S.E., & Lucier, B.J. (2011). An upwind finite-difference method for total variation-based image smoothing. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 4(1), 277-299.
- [16] Abergel, R., & Moisan, L. (2017). The Shannon total variation. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 59(2), 341-370.
- [17] ISO-17636-2. (2022). Non-destructive testing of welds—Radiographic testing—Part 2: X- and Gamma-Ray techniques with digital detectors. International Organization for Standardization, Geneva.
- [18] EN-12681-2. (2017). Founding. Radiographic testing. Techniques with digital detectors. European Standards Organization.
- [19] MacRumors. (2018). 2018 iPhones wireless charging copper coil rumor. Retrieved from <https://www.macrumors.com/2018/08/20/2018-iphones-wireless-charging-copper-coil-rumor/>.
- [20] Condat, L. (2017). Discrete total variation: New definition and minimization. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 10(3), 1258-1290.
- [21] Ma, S. (2016). Alternating proximal gradient method for convex minimization. *Journal of Scientific Computing*, 68(2), 546-572.
- [22] Deng, W., & Yin, W. (2016). On the global and linear convergence of the generalized alternating direction method of multipliers. *Journal of Scientific Computing*, 66(3), 889-916.
- [6] Aryan, P., Sampath, S., & Sohn, H. (2018). An overview of non-destructive testing methods for integrated circuit packaging inspection. *Sensors*, 18, 1981.
- [7] Bansal, G., & Ramakrishna, K. (2011). A new approach for early detection of PCB pad cratering failures. Cisco Systems Inc., San Jose, CA.
- [8] Fu, Z., Goyal, D., Thomas, J., Crawley, A., & Ramsey, A. (2003). 3D X-ray computed tomography (CT) for electronic packages. 29th International Symposium for Testing and Failure Analysis, Santa Clara, CA, USA.
- [9] Global Industry Analysts, Inc. (2019). Industrial X-ray inspection systems - Market analysis, trends, and forecasts. USA.
- [10] Zhang, Q., Zhang, M., Gamanayake, C., Yuen, C., Geng, Z., Jayasekara, H., Woo, C., Low, J., Liu, X., & Guan, Y.L. (2022). Deep learning based solder joint defect detection on industrial printed circuit board X-ray images. *Complex & Intelligent Systems*, 8, 1525-1537. <https://doi.org/10.1007/s40747-021-00600-w>.
- [11] Villaraga-Gómez, H., & Bell, J.D. (2019). Modern 2D & 3D X-ray technologies for testing and failure analysis. \*ISTFA Proceedings, 45th International Symposium for Testing and Failure Analysis.
- [12] Yahaghi, E., Mirzapour, M., & Movafeghi, A. (2020). Enhancing flaw detection in aluminum castings by two different mixed noise removal methods. *Physica Scripta\**, 95, 075302.
- [13] Yahaghi, E., & Hosseini-Ashrafi, M.E. (2020). Comparison of the performance of three domain transform filters for radiographic contrast enhancement of welded objects. *Insight*, 62(6).
- [14] Rudin, L.I., Osher, S., & Fatemi, E. (1992).