

האוניברסיטה הפתוחה

המחלקה למתמטיקה ולמדעי המחשב

עבודה מסכמת בנושא

"זיהוי תקלות בתמונות דחוסות של מעגלים מודפסים"

העבודה המסכמת הוגשה כחלק מהדרישות לקבלת תואר

"מוסמך למדעים" M.Sc. במדעי המחשב

באוניברסיטה הפתוחה

החטיבה למדעי המחשב

על ידי

אלון שולחמי

ת"ז 025098997

העבודה הוכנה בהדרכתו של ד"ר ג'ק וינשטיין

2009

תוכן עניינים

| | |
|--------|--|
| - 4 - | רשימת איורים |
| - 5 - | תקציר |
| - 6 - | סקירת ספרות |
| - 6 - | מטרת העבודה |
| - 7 - | 1. מבוא |
| - 7 - | 1.1. מהו מעגל מודפס |
| - 8 - | 1.2. תהליך בניית מעגל מודפס |
| - 9 - | 1.3. סוגי התקלות במעגל מודפס |
| - 11 - | 1.4. בעיות תפוקה בייצור מעגלים מודפסים |
| - 12 - | 1.5. פתרונות לבעיות תפוקה בייצור מעגלים מודפסים |
| - 12 - | 1.6. חשיבות בדיקת המעגלים המודפסים ומציאת התקלות בתהליך הייצור |
| - 13 - | 2. סוגי מערכות למציאת תקלות במעגלים מודפסים |
| - 13 - | 2.1. מערכות אופטיות |
| - 13 - | 2.2. מערכות קרני רנטגן |
| - 13 - | 2.3. מערכות אולטרא סוניות |
| - 14 - | 2.4. מערכות תרמיות |
| - 15 - | 3. שיטות אופטיות למציאת תקלות במעגלים מודפסים |
| - 15 - | 3.1. מבוא |
| - 15 - | 3.2. שיטות השוואה |
| - 15 - | 3.2.1. השוואת תמונה |
| - 17 - | 3.2.2. השוואת מבנים |
| - 17 - | 3.2.3. השוואת פאזה |
| - 17 - | 3.3. שיטות ללא השוואה |
| - 18 - | 3.3.1. בדיקת היוצא דופן |
| - 18 - | 3.3.2. בדיקת תכנון |
| - 18 - | 3.4. שיטות משולבות |
| - 20 - | 4. פעולות מורפולוגיות |
| - 20 - | 4.1. כרסום (Erosion) |
| - 21 - | 4.2. הרחבה (Dilation) |
| - 23 - | 4.3. פתיחה (Opening) |
| - 24 - | 4.4. סגירה (Closing) |
| - 24 - | 4.5. פגע או החטא (Hit or miss) |
| - 26 - | 4.6. דיקוק (Thinning) |
| - 31 - | 4.7. שילוד (Skeletonization) |
| - 33 - | 5. אלגוריתם לבדיקת מעגלים מודפסים עבור תמונות דחוסות |
| - 33 - | 5.1. דחיסת RLE (Run Length Encoding) |
| - 34 - | 5.2. אלגוריתם לחלוקת התמונה למקטעים המכילים צורות בסיסיות |
| - 39 - | 5.3. השוואת צורות בסיסיות |
| - 41 - | 5.4. סינון פגמים מתמונת ההבדלים |
| - 44 - | 5.5. פעולת כרסום על תמונה דחוסה RLE |
| - 46 - | 6. מימוש האלגוריתמים |
| - 46 - | 6.1. בינריזציה |
| - 47 - | 6.2. מבנה הנתונים של תמונה דחוסה בשיטת RLE |

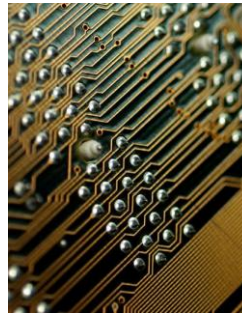
| | |
|------------------|--|
|- 48 -..... | 6.3. חלוקת התמונה לחלונות והתאמתם לתמונה |
|- 49 -..... | 6.4. תמונות מבני היסוד |
|- 49 -..... | 6.5. מציאת הפגמים |
|- 51 -..... | 7. בדיקת הביצועים |
|- 51 -..... | 7.1. מציאת תמונת הבדלים – הדרך הפשוטה |
|- 53 -..... | 7.2. ביצוע הכרסום כחלק מסינון הפגמים |
|- 56 -..... | 8. סיכום |
|- 58 -..... | 9. ביבליוגרפיה |

רשימת איורים

| | |
|--------------|--|
| - 7 - | איור 1 : מעגל מודפס א' [15] |
| - 8 - | איור 2 : מעגל מודפס ב' [15] |
| - 16 - | איור 3 : תמונת הפרשים |
| - 19 - | איור 4 : מפת מבנים |
| - 21 - | איור 5 : דוגמה לכרסום |
| - 22 - | איור 6 : דוגמה להרחבה |
| - 23 - | איור 7 : דוגמה לפתיחה |
| - 24 - | איור 8 : דוגמה לסגירה |
| - 25 - | איור 9 : דוגמה לפעולת פגע או החטא |
| - 27 - | איור 10 : דוגמה לדיקוק |
| - 31 - | איור 11 : דוגמה לשילוד [14] |
| - 35 - | איור 12 : קצה עם חתך אחד |
| - 36 - | איור 13 : קצה עם חתך כפול |
| - 37 - | איור 14 : סוגי הזזות לקצה חלון |
| - 38 - | איור 15 : רשת חלונות |
| - 40 - | איור 16 : מטריצת תמונה |
| - 43 - | איור 17 : כרסום עם מבנה מסוים |
| - 46 - | איור 18 : תמונת גווני אפור, [16] |
| - 47 - | איור 19 : תמונת שחור לבן כתוצר בינריזציה, [16] |
| - 48 - | איור 20 : התאמת חלונות |
| - 49 - | איור 21 : מבני יסוד |
| - 51 - | איור 22 : תמונה לעיבוד |

תקציר

בעולמנו הטכנולוגי המעגלים המודפסים הינם חלק בלתי נפרד מכל מכשיר אלקטרוני בשימוש, כדוגמת טלוויזיה, מיקרוגל וכדומה. מעגל מודפס הינו פיסת חומר מבודד שעליו פסי מתכת (נחושת לרוב) אשר יוצרים מעגל חשמלי כזה או אחר.



דוגמה למעגל מודפס:

עם התקדמות הטכנולוגיה והיכולת למזער מעגלים מודפסים נהפך שלב בדיקת המעגלים המודפסים בקו הייצור למשימה מורכבת הצורכת משאבי חישוב ואחסון רבים שכן כמויות המידע גדלו באופן דרמטי. ציר החישוביות - על מנת להתמודד עם ניתוח מידע כמותי רב כל כך פותחו מספר גישות ואלגוריתמים אשר מסוגלות לעבד את תמונות המעגלים המודפסים ולהוציא מהן את הפרטים המעניינים לתהליך הייצור בזמן סביר בעוד שמשימה זו אינה אפשרית לבן אנוש בזמן סביר. ציר האחסון - כמו בהרבה תחומים אחרים הדרך להתמודד עם גידול מידע זה הינו לאחסנו בצורה דחוסה זו או אחרת.

בעבודה זו אציג רקע לנושא בדיקת המעגלים המודפסים, אממש ואתח אלגוריתם המשלב את התקדמות המדע בשני הצירים הנ"ל, אלגוריתם לזיהוי תקלות במעגלים מודפסים ע"י ניתוח של תמונה דחוסה באופן ישיר ולא ע"י אי-דחיסתה. כמו הרבה אלגוריתמים לעיבוד תמונה גם אלגוריתם זה משתמש רבות בפעולות מורפולוגיות. ההבדל נעוץ בכך שיש לבצען ישירות מעל תמונות דחוסות RLE ולכן חלק מהעבודה הינו הצגת אלגוריתם לביצוע פעולות מורפולוגיות מסוימות, ישירות מעל תמונה דחוסה RLE. לאחר ההסברים המפורטים על אלגוריתמים אלו, מימשי אותם ובדקתי את ביצועיהם. בסיום העבודה אציג מסקנות וידע שרכשתי במהלך מימוש האלגוריתם עם אבחנה ברורה כי ביצועי הזמן של האלגוריתם לזיהוי תקלות במעגלים מודפסים ע"י ניתוח של תמונה דחוסה באופן ישיר אינם תלויים בגדלי ובצורות המבנים השונים שבמעגל המודפס.

סקירת ספרות

עולם המעגלים המודפסים קיים מזה שנים רבות. כמו היבטים רבים בעולמנו הטכנולוגי גם תחום זה התפתח משמעותית במהלך השנים. היכולת לייצר מעגלים מודפסים קטנים יותר מבעבר הניבה דרישה לעבד כמויות מידע גדולות יותר מבעבר על מנת למצוא את התקלות במעגלים אלו. הדרך הפשוטה היא כמובן להגדיל את מספר משאבי החישוב ביחס זהה לגידול בכמות המידע. הדרך היותר מתחכמת הינה לחפש דרכים לעבד את המידע המוגדל באותם משאבים ששימשו אותנו עד כה. אתגר זה הינו אתגר לא פשוט שמושך אליו חוקרים ומהנדסים ברחבי העולם כל הזמן. חלק מהרקע שרכשתי לעבודה זו היה ממקור [2] שסיפק סקירה של השיטות השונות לבדיקת מעגלים מודפסים. כמו כן היו עוד מספר מקורות אשר תיארו שיטות שונות לבדיקת מעגלים מודפסים: [1], [3], [4]. כל חוקר וכל מהנדס מנסה בכיוון אחר לתקוף את הבעיה. אחדים מתקדמים יותר, אחרים פחות, אך ביחד תחום זה התקדם משמעותית במהלך השנים. בעבודה זו ננסה להתקדם מספר צעדים בכיוון מסוים ולשפוך קצת אור על היתרונות והחסרונות של כיוון זה.

אחת הבעיות הגדולות של גידול בכמות המידע הינה בעיית האחסון. התמודדות עם בעיה זו היא אחסון המידע בצורה דחוסה. האלגוריתמים שנכתבו לבדיקת מעגלים מודפסים מניחים כי המידע המעובד נמצא זמין ונגיש. כאשר המידע דחוס אזי על מנת לקבל את המידע יש "לפתוח" אותו. תהליך זה כמובן צורך זמן חישוב נוסף ודורש כי לפחות חלק מהמידע יתפוס נפח גבוה בצורה שאינה דחוסה. בעקבות כך נחקרו כיוונים שיאפשרו עיבוד תמונה ישירות מעל התמונה הדחוסה, [11], [12]. היתרונות של שיטות אלו הן שאין צורך בנפח אחסון נוסף (לפחות לא משהו משמעותי) מעבר לנפח התמונה הדחוסה של המעגל המודפס. זהו הכיוון בו ארצה להתקדם בעבודה זו.

אני עובד בתעשייה דומה לתעשיית המעגלים המודפסים והיא תעשיית המעגלים המשולבים. במהלך שנות עבודתי לא נתקלתי במימושים של אלגוריתמים המופעלים על תמונות דחוסות באופן ישיר ולכן החלטתי כי אבדוק את נושא מימוש מציאת הפגמים במעגלים מודפסים מעל תמונות דחוסות וכי אחקור ואנסה להבין את בעיות המימוש של אלגוריתם שכזה. במידה וישנם בעיות משמעותיות המפריעות למימוש פרקטי של אלגוריתמים שכאלה אזי הדבר יהווה נקודה למחשבה לכל חוקר אחר אשר יתעסק בתחום זה. במידה ולא אמצא בעיות משמעותיות הרי שאולי עבודה זו תסלול את הדרך לשימוש באלגוריתם מעל תמונה דחוסה בתעשייה.

מטרת העבודה

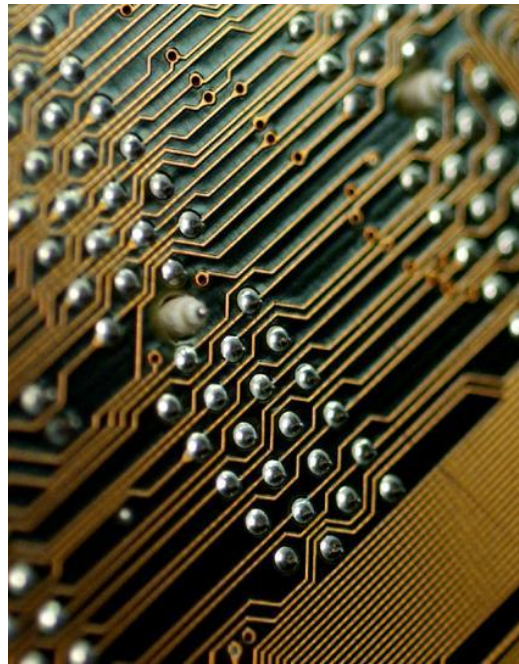
מטרת עבודה זו היא בדיקת מעשיות של אלגוריתם לזיהוי תקלות במעגלים מודפסים ע"י ניתוח של תמונה דחוסה. ייחודו של אלגוריתם זה הוא בכך שהוא פועל ישירות מעל תמונה דחוסה. על ידי מימוש האלגוריתם ניתן להבין בצורה טובה מהם היתרונות והחסרונות של עבודה מעל תמונה דחוסה, ובפרט חישוב פעולות מורפולוגיות מעל תמונות דחוסות RLE.

1. מבוא

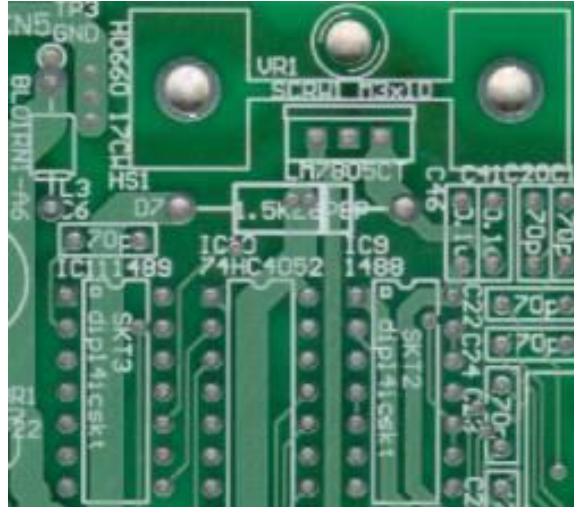
1.1. מהו מעגל מודפס

בעולמנו הטכנולוגי אנו משתמשים במספר רב של מכשירים חשמליים. כל מכשיר שכזה מורכב בתוכו ממספר עצום של מעגלים חשמליים. איך מרכיבים מספר גדול כל כך של מעגלים חשמליים במכשיר? האם פזורים לנו אלפי חוטים ורכיבים שונים בתוך המיקרוגל? התשובה לכך היא לא. כל יצרן של מכשיר כלשהו יעדיף ליצור מכשיר שאינו תלוי באדם שמרכיב אותו ושיהיה קל לתחזוקה. אם היינו מרכיבים את המכשירים שבביתנו מחוטים היינו מקבלים מכשירים גדולים, מסובכים לתחזוקה ועם "פלונטר" אחד גדול מאחור. אנחנו מעוניינים ליצור מעגלים חשמליים, שיהיו קומפקטיים ככל שניתן ומאוגדים ליחידות לוגיות שניתנות להחלפה. המענה לדרישה זו הוא למעשה המעגל המודפס. מעגל מודפס הינו פיסת חומר מבודד שעליו פסי מתכת (נחושת לרוב) אשר מרכיבים את המעגל החשמלי. ממציא המעגל המודפס היה אוסטרי בשם פול אייסלר, כאשר עבד באנגליה ויצר ב-1936 את המעגל המודפס הראשון כחלק מרדיו שהרכיב.

להלן תמונות של חלק ממעגל מודפס:



איור 1: מעגל מודפס א' [15]



איור 2 : מעגל מודפס ב' [15]

ניתן לראות את פסי הנחושת החומים על גבי החומר המבודד הירוק כהה אשר יוצרים מעגלים חשמליים שונים.

2.1 תהליך בניית מעגל מודפס

תהליך בניית המעגל המודפס מורכב ממספר שלבים כדלהלן:

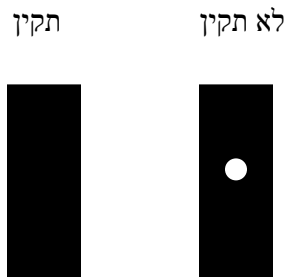
1. שלב התכנון - תכנון המעגלים החשמליים מתבצע על תוכנות ייעודיות אשר מאפשרות לשרטט את המעגלים החשמליים בצורה מובנית. מתכנן המעגל משרטט על גבי מסך המחשב את המעגל ותוצר התהליך הינו קובץ בפורמט מסוים אשר מכיל את התכנון.
2. שלב יצירת המסכה - בשלב זה היצרן מדפיס את המעגל החשמלי על גבי סרט צילום אשר רגיש לאור. תהליך זה מתבצע לרוב ע"י מכונות photo plotter אשר, בהינתן קובץ לתכנון וסרט צילום, מציירות על סרט הצילום באמצעות לייזר את קווי התכנון.
3. שלב הציפוי – בשלב זה מצפים את החומר המבודד בשכבת נחושת ולאחר מכן מצפים את שכבת הנחושת בשכבה נוספת של חומר רגיש לאור ואשר מתקשה בחשיפה לאור.
4. שלב החשיפה – בשלב זה משתמשים במסכה שיצרנו בשלב 2 וחושפים לאור את הלוח המצופה באמצעות המסכה. מה שקורה בתהליך זה שאזורי הנחושת אשר אנו מעוניינים שיישארו על הלוח וירכיבו את המעגל החשמלי נהיו יותר קשים, שכן הם נחשפו לאור.
5. שלב האיכול – בשלב זה אנו טובלים את הלוח בסוג מסוים של חומצה. החומצה מאכלת קודם כל האזורים ה"רכים", אזורים שלא נחשפו לאור וכך נשארו למעשה עם קווי נחושת אשר מרכיבים את המעגל החשמלי שרצינו ולא יותר מכך.
6. שלב הניקוי – בשלב זה מנקים את הלוח משאריות שאולי נותרו מהשלבים הקודמים.

התהליך הנ"ל מתאר מעגל מודפס אשר מורכב משכבה אחת, זהו למעשה מעגל חשמלי אחד גדול. אך העולם הטכנולוגי התפתח וקמה דרישה למעגלים חשמליים מורכבים יותר, גדולים יותר. ניתן לתאר דרישה זו כדרישה ליותר לוגיקה במעגלים חשמליים. דרך אחת קלה ונפוצה להתמודד עם דרישה זו הינה ליצור מעגלים חשמליים במספר שכבות, בדומה לבניין מגורים רב קומות. בכל קומה גרים דיירים אשר עוסקים בענייניהם, כאשר יש צורך ליצור קשר עם קומה אחרת ישנה מעלית לקומה מעל או לקומה מתחת. על עקרון זה נבנים מעגלים מודפסים כאשר בין שתי שכבות שמים חומר מבודד ואשר רק בנקודות מסוימות יוצרים תחליף למעלית – מוליך המחבר בין שתי השכבות.

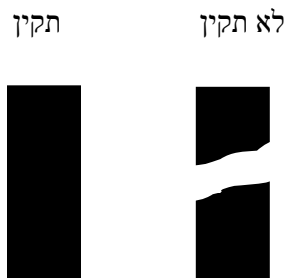
3.1 סוגי התקלות במעגל מודפס

להלן פירוט והסבר על סוגי התקלות האפשריות במעגלים מודפסים:

1. חור (pin hole) – כאשר במוליך מסוים (פס נחושת) נוצר חור. תקלה זו עלולה לגרום לנתק שכן בעומסים מסוימים נקודות אלו עלולות להתחמם על יתר מידה ולהתקלקל.



2. מוליך פתוח (open circuit) – כאשר קו של מוליך נקטע ואינו יוצר רצף של מוליך.



3. מיעוט איכול (underetch) – כאשר שלב האיכול מתבצע פחות זמן מהדרוש אזי לא כל האזורים שאינם מוליכים מאוכלים. במקרה זה יתכן שייווצרו קצרים בין מוליכים.



4. כרסום במוליך (mousebite) – כרסום במוליך עלול לגרום לנתק.

תקין לא תקין



5. מוליך חסר (missing conductor) – זהו למעשה נתק בין שני חלקי המעגל.

תקין לא תקין



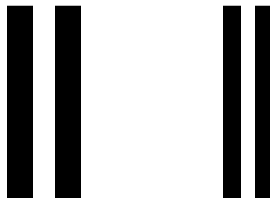
6. תוספת מוליך (spur) – עלול לגרום לקצר שכן תוספת המוליך עלולה לחבר בין שני מוליכים.

תקין לא תקין



7. מוליכים קרובים (conductors too close) – עלול לגרום לתפקוד לא תקין של המעגל החשמלי מפאת הפרעות חשמליות שמוליך אחד ישרה על מוליך הצמוד אליו.

תקין לא תקין



8. חור חסר (missing hole) – עלול לגרום לנתק בין השכבות השונות של המעגל המודפס, או באופן כללי לנתק במעגל החשמלי.

לא תקין תקין



9. איכול יתר (overetch) – החתך המוצג באיור הינו חתך אנכי אשר מראה את גובה קווי ההולכה. איכול יתר עלול לגרום להפרעות חשמליות (מכיוון שגובה קו המוליך אינו מספק) ולנתק (מכיוון שקו ההולכה נאכל לחלוטין)

לא תקין תקין



ישנם גוונים רבים לכל סוגי תקלה אך המקבץ שמתואר לעיל מכיל את הקטגוריות הראשיות של סוגי התקלות.

4.1 בעיות תפוקה בייצור מעגלים מודפסים

חברות המייצרות מעגלים מודפסים שואפות, כמובן, להגיע ל- 100% ניצולת, כלומר 100% מהמעגלים שיוצרו הינם תקינים. על מנת להגיע לאחוזים שקרובים ל- 100% נדרש הרבה תכנון ומאמץ. על סמך תיאור תהליך ייצור המעגל המודפס שניתן בסעיפים הקודמים ניתן להבין כי זה איננו תהליך פשוט, אלא תהליך מורכב שבנוי ממספר שלבים ושכל שלב דורש דיוק מרבי. העובדה שהתהליך מורכב ובנוי ממספר שלבים מגדילה את הסיכוי לטעות ומקטינה את הסיכוי להגיע לאחוזי ניצולת גבוהים. להלן סיבות פוטנציאליות לגרימת פגמים:

- סביבה לא נקייה – בסביבה לא נקייה יתכן כי משהו/משהו ילכלך את המעגל ויגרום לפגם. כדוגמה ניתן לקחת את שלב הקרנת המסכה על המעגל. אם ייפול לכלוך על המסכה אזי הדבר ייראה כחלק מהמסכה ואזור זה לא ייחשף לאור על המעגל, מה שיגרום בשלב מאוחר יותר בתהליך לאיכול יתר באזור זה. דוגמה זו הראתה כי לכלוך פשוט, קטן ככל שיהיה, יכול לגרום לייצור מעגל מודפס לא תקין.

- תקלות של מכונות הייצור – מכונות הייצור הינם מכונות אשר מבוססות על תהליכים כימיים כאלה ואחרים. במכונות אלו סטייה קטנה מהתהליך המתוכנן עלולה להרוס את כל התהליך. לדוגמה אם המכונה אשר טובלת את המעגל בחומר מאכל תסטה מהזמן הנומינלי שדרוש להליך זה בשל בעיית חומרת או תוכנה אזי נקבל תופעות של איכול יתר/פחת בהתאמה.

5.1. פתרונות לבעיות תפוקה בייצור מעגלים מודפסים

ניתן לחלק את הפתרונות לבעיות התפוקה לשתי קבוצות:

1. כפל לוגיקה (redundancy) – במקומות על המעגל המודפס אשר פוטנציאלית הטכנולוגיה מיועדת לספוג יותר תקלות יוצרים כפל לוגיקה של אזור זה במעגל כך שאם אזור אחד נהיה תקול ישנו האזור המקביל לו שישמש כגיבוי. שיטה זו אינה ממומשת על כל המעגל שכן היא בזבזנית במשאבים – במקרי קיצון עלות של כל מעגל מודפס תהיה כפולה ממה שבאמת צריך להיות שכן המעגל יכיל כפל רכיבים מאשר צריך בתכנון וייצור אידיאלי.
2. בקרה - אמנם לא כל פגם יסתיים במעגל מודפס תקול אך על מנת להבטיח ניצולת גבוהה של התהליך חברות המייצרות מעגלים מודפסים אינן לוקחות סיכון ודורשות בקרה תמידית ומדויקת על התהליך. מעבר לכך, בקרה צמודה יכולה לאפשר במקרים מסוימים להחזיר את תהליך הייצור שלב אחד או שניים אחורה ובכך להתגבר על הפגם.

6.1. חשיבות בדיקת המעגלים המודפסים ומציאת התקלות בתהליך הייצור

בדיקת המעגלים המודפסים הינה קריטית על מנת להגיע לניצול גבוה של ייצור. באמצעות בדיקה של מעגלים מודפסים ניתן להשיג את הדברים הבאים:

1. זיהוי תקלות/שונות במכונות הייצור – במידה ואנו מבצעים בקרה שוטפת על המעגלים המודפסים לאחר כל שלב בייצור אזי נוכל לזהות באופן מיידי אם סוג מסוים של מכונות ייצור או לחלופין מכונה מסוימת לא תפקדה כהלכה. גילוי התקלה מיד לאחר השלב שבו התקלה קרתה יאפשר לנו
 - a. לעצור את מקבץ המעגלים המודפסים התקול מלהמשיך בשלבי הייצור הבאים ובכך לחסוך את עלות הייצור החלקית.
 - b. במקרים מסוימים לבצע תיקון לתקלה שקרתה ולהחזיר את המעגלים המודפסים לפס הייצור
 - c. למנוע ממקבצים נוספים של מעגלים מודפסים לעבור דרך אותם מכונות ייצור פגומות. כדוגמה ניתן לקחת מכונה המבצעת את תהליך האיכול. אם נבצע את בדיקת המעגלים המודפסים לאחר שלב האיכול אזי נוכל לגלות תקלות בשלב זה. במידה ומצאנו תקלה נוכל לדעת איזו מכונת איכול גרמה לכך ולהרים "דגל אדום" שאין להמשיך בתהליך הייצור עם מכונת איכול זו.
2. תיקון/מעקף תקלות במעגל המודפס – במקרים מסוימים ניתן להחזיר את הגלגל אחורה ולתקן תקלות שנוצרו וע"י כך כמובן להגדיל את ניצולת הייצור. לדוגמה אם נשארו שאריות נחושת ניתן לנקותם וע"י כך למנוע קצרים פוטנציאליים.
3. שיפור התהליך – ניתן לקשר בין מעגלים תקולים לבין פגמים שהתגלו במהלך הייצור ולהבין טכנולוגית מהי החוליה החלשה בשרשרת על מנת לשפר אותה.

2. סוגי מערכות למציאת תקלות במעגלים מודפסים

במקור [2] ישנה סקירה מקיפה על מגוון השיטות והמערכות למציאת תקלות במעגלים מודפסים. המידע בסעיף זה ובסעיף הבא נלקח ממאמר זה.

1.2 מערכות אופטיות

המערכות האופטיות מבוססות, מן הסתם, על מערכת עדשות/מיקרוסקופ אשר מאפשרות להתבונן ברזולוציה טובה על משטח המעגל המודפס ולבחון אותו באופן אוטומטי ע"י עיבוד תמונה. מערכות אלו יודעות לזהות פגמים אשר נמצאים על פני השטח במעגל, בדומה לבדיקה הידנית שהתבצעה עד בואם של המערכות האוטומטיות. סוגי הפגמים שמתגלים במערכות אלו הם: קצרים, חוסר במוליכים, רכיבים חסרים וכו'. כמו כן מערכות אלו מסוגלות לזהות מאפיינים בעייתיים כגון: רוחב קווי הנחושת, מרווחים בין מוליכים, חורים וכו'. את סוגי הפגמים שצוינו לעיל קשה עד בלתי אפשרי לזהות באמצעות בדיקה אלקטרונית של המעגל. בדיקה שכזו תוכל לתת לנו אינפורמציה אם חלק כזה או אחר במעגל מתפקד אך לא את הסיבות לכך, דבר שמערכות אופטיות באמצעות עיבוד תמונה מתאים מסוגלות לספק. לדוגמה אם שני קווי מוליכים הינם קרובים אחד לשני יותר מהדרישה וגורמים להשראה, יתכן כי תופעה זו לא תורגש בבדיקה אלקטרונית בדידה אלא לאורך זמן ואילו בבדיקה אופטית ניתן לגלות פגמים שכאלו. מערכות אופטיות מוגבלות פחות מאשר מערכות בדיקה אלקטרוניות בהיבט יכולת ההתמודדות עם רזולוציות תכנון המעגל, כלומר מערכות אלה יתמודדו בהצלחה עם טווח יותר רחב של שינוי בתכנון. דוגמה למערכת מסוג זה הינה מכונת ה- Discovery™ של חברת אורבוטק. מידע מדויק לגבי איך המערכת בנויה אינו זמין שכן זהו מידע מסחרי מסווג אך זוהי מערכת אופטית המבוססת על העקרונות שתוארו בסעיף זה.

2.2 מערכות קרני רנטגן

מערכות קרני רנטגן משמשות לבדיקה מהירה ומדויקת של מעגלים מודפסים רבי שכבות. מכיוון שבאמצעות קרני רנטגן אנו מסתכלים מספר שכבות לתוך המעגל שיטה זו מאפשרת לקבל מידע על הסטייה בין השכבות ומידע על העיוותים שקרו לכל שכבה ושכבה. בנוסף לכך באמצעות שיטה זו ניתן לגלות פגמים מסוג קצרים עדינים, חורים, מוליכים מיותרים וכו'. מערכות אלו די דומות למערכות אופטיות ובאופן סכמטי ניתן לומר שההבדל ביניהן הוא מודול ההארה ולקייחת התמונה. במערכות קרני רנטגן מודול זה נותן את תמונות קרני הרנטגן לעומת תמונות האור הנראה שמסופק במערכות האופטיות.

3.2 מערכות אולטרא סוניות

מערכות אולטרא סוניות מתמחות בנקודות החיבור של המוליכים במעגל המודפס ומציאת פגמים באזורים אלו. מערכות אלו יוצרות תמונה מדויקת ע"י סריקה אנכית ואופקית של המעגל המודפס סביב נקודות החיבור ופענוח גלי הקול החוזרים מהמשטח. מערכות אלו נעזרות בנוזל אשר מאפשר את שליחת הפולסים האולטרא סוניים מהמשדר עד לנקודות החיבור במעגל. מערכות אלו מיועדות עבור אפליקציות ספציפיות וקשה להכליל אותם לגילוי כללי על גבי מעגל מודפס כמו מערכות קרני רנטגן ומערכות אופטיות.

4.2. מערכות תרמיות

מערכות אלו מכוונות למצוא נקודות חום במעגל שיכולים להצביע על קצרים וחלקים במערכת שנמצאים גבוליים מבחינת ביצועים ועלולים לקרוס/להישרף. כמו המערכות האולטרא סוניות גם פה השימושים שניתן למצוא למערכות אלו הם מאוד ספציפיים ולא ניתן להשתמש במערכות אלו כמערכות כלליות לגילוי פגמים. בנוסף לכך החיסרון של מערכות אלו הוא שהן משמשות לשלבים יותר מתקדמים בייצור המעגל המודפס ולא ניתן לשלב אותם ביעילות בשלבים הראשונים של ייצור המעגל.

3. שיטות אופטיות למציאת תקלות במעגלים מודפסים

1.3.1 מבוא

המערכות האופטיות הינן הנפוצות ביותר למציאת תקלות במעגלים מודפסים. מערכות אלו מבוססות על דגימת תמונת המעגל המודפס וביצוע ניתוח מסוים למציאת התקלות. ניתן לחלק את שיטות הניתוח לשלושה סוגים: שיטות השוואה, שיטות בדיקת תכונות ושיטות אשר משלבות בין שני הסוגים. בפרק זה אסביר ואפרט על כל אחת משיטות אלו, הנחות היסוד שלהן, יתרונותיהן והסרונותיהן.

2.3 שיטות השוואה

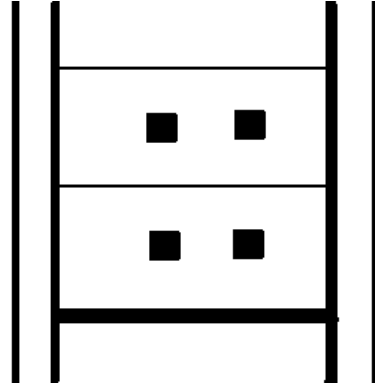
שיטות ההשוואה, כשמן כן הן, מבצעות השוואה בין נקודה לנקודה או בין רכיב לרכיב כאשר קבוצה אחת היא המעגל המודפס כמו שהוא ואילו קבוצת ההשוואה הינה דוגמה "טובה" למעגל. דוגמה "טובה" למעגל יכולה להיות דגימה של מעגל אשר אנו יודעים שהוא תקין ואשר נשמרה בבסיס הנתונים בתור בסיס להשוואה. באמצעות שיטות אלו ניתן לגלות את כל סוגי התקלות, כאשר שיטות ההשוואה הן למעשה סימולציה אוטומטית מהירה ומדויקת של תהליך הבדיקה הידני. החיסרון של שיטות ההשוואה הוא גילוי הפגמים המוטעה במקרים מסוימים. מכיוון שאנו בודקים הבדלים בין מעגלים מודפסים אנו יכולים לכנות פגם איזשהו עיוות במעגל המודפס שנובע משונות תהליך הייצור ואינו באמת ובתמים פגם. לדוגמה אם פינה מסוימת של מוליך יצאה עגולה ברדיוס מעט שונה מהסטנדרט, הדבר יחשב כפגם בעוד שלא בהכרח זה כך. הדרך הנפוצה להתמודד עם בעיות שכאלו היא שימוש באלגוריתמים המנסים לסווג באופן אוטומטי מי מההבדלים הוא אמיתי ומעניין ומי לא.

את שיטות ההשוואה ניתן לחלק לשלוש קבוצות: השוואת תמונה, השוואת מבנים והשוואת פאזה.

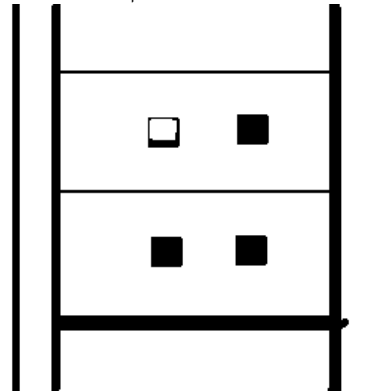
1.2.3 השוואת תמונה

הטכניקה הפשוטה והטבעית ביותר בהשוואת תמונה היא כמובן החסרת התמונות. החסרת תמונה מתמונה אחרת הייתה אחת השיטות הראשונות אשר נעשה בה שימוש בבדיקת המעגלים המודפסים. באופן כללי השיטה עובדת כדלקמן: משטח המעגל המודפס נסרק ע"י מכונת הבדיקה ומתמונת המעגל המודפס הנוכחי מוחסרת תמונת המעגל האידיאלי (תמונת המעגל האידיאלי, כפי שכבר צוין לעיל, הינה תמונה של מעגל אשר אנו יודעים שהוא תקין ואשר נשמרה בבסיס הנתונים בתור בסיס להשוואה). תמונת ההפרשים למעשה מראה לנו פגמים פוטנציאליים במעגל המודפס וניתן להציגה ולבצע עליה ניתוח כלשהו. לרוב מתבצע ניתוח אלגוריתמי של תמונת ההפרשים שכן לא כל הפרש שנמצא אכן הוא פגם ודרוש ניתוח אלגוריתמי אשר יודע להפריד בין הפרש שמייצג פגם והפרש שהוא התראת שווא.

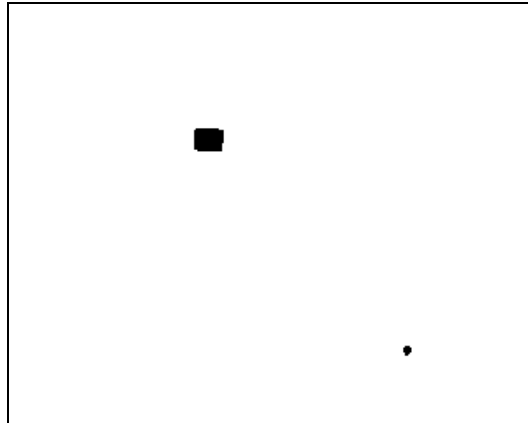
להלן דוגמה של תמונת הפרשים.
תמונת היחס שנלקחה ממקום כלשהו במעגל המודפס:



התמונה אותה אנו רוצים לבדוק:



להלן תמונת הפרשים בין התמונה הנבדקת לתמונת היחס. ניתן לראות בקלות את ההבדלים בין התמונות.



איור 3 : תמונת הפרשים

את תמונת ההפרשים של תמונות בינריות ניתן ליצור ע"י פעולת XOR. היתרון של שיטה זו הוא שהיא פשוטה מאוד ליישום בחומרה וכך ניתן להשיג קצב עיבוד מידע גבוה. שיטה זו של החסרת תמונה סובלת מהרבה בעיות מעשיות כגון יישור התמונה שנסרקה מול הדגם התיאורטי, שונות צבע של המעגל המודפס, שונות התאורה/ההחזר של המעגל המודפס. הדרך להתמודד עם בעיות אלו, כפי שצינתי, היא לבצע פעולות ניתוח נוספות על תמונת ההפרשים עד לקבלת תמונת מצב אמיתית.

2.2.3. השוואת מבנים

טכניקה נוספת שנופלת תחת הקטגוריה של השוואת תמונה והינה שכלול מסוים של החסרת תמונה הינה השוואת מבנים. ניתן להניח כי מעגל מודפס מורכב מכמה מבני יסוד כגון קו מוליך אנכי, קו מוליך אופקי, נקודת חיבור וכו'. בשיטת השוואת המבנים אנו מזהים את מבני היסוד בתמונה ומשווים אותם לתמונה של מבנה תקין מאותו הסוג. בכך שפירקנו את התמונה לתת ישויות לוגיות (מבנים) והשווינו אך ורק מבנה למבנה אנו מבודדים רעש מהתמונה בכללותה ומתמקדים בכל מבנה ומבנה. אחד היתרונות של שיטה זו שתמונת המעגל המודפס מיוצגת ע"י רשימת מבנים ובכך תופסת בצורה משמעותית פחות זיכרון מאשר התמונה הכוללת ברזולוציה מלאה. בנוסף לכך, כפי שכבר הזכרתי, עבודה עם יחידות לוגיות של מבנה מקטינה את רגישות המערכת לשינויים קלים בתמונה ובכך נותנת מערכת יציבה יותר מאשר השוואת תמונה פשוטה. אחד החסרונות של שיטה זו הוא שאנו צריכים ליצור מאגר גדול של מבני בסיס אשר ננסה לזהות אותם בתמונה, ובנוסף לכך תהליך הזיהוי וההתאמה לרשימה זו עלול להיות יקר חישובית. הדרך להתמודד עם הבעיות הנ"ל הינה לנרמל את המבנים כך שייצוגם לא יהיה תלוי בגודל, סיבוב ומיקום ובכך רשימת מבני הבסיס שלנו תצטמצם משמעותית. גם בשיטה זו יש ליישר את התמונה שנסרקה אל מול הדגם על מנת לקבל תוצאות טובות ואמינות.

3.2.3. השוואת פאזה

טכניקה נוספת שנופלת תחת הקטגוריה של השוואת תמונה הינה תמונת פאזה. המטרה של כל השיטות הינה להוריד את המידע שחוזר על עצמו בין המודל התיאורטי והתמונה שנסרקה ולהדגיש את ההבדלים שהם פגמים בפוטנציה. ניתן לנצל את התמרת פורייה על מנת להשיג מטרה זו. ניקח את תמונת הדגם ואת התמונה שנסרקה ונשים אותם זו ליד זו, להלן התמונה המאוחדת. לאחר מכן נמיר את התמונה המאוחדת באמצעות התמרת פורייה. בתמונה שקיבלנו כעת פיקסלים מחזוריים יקבלו אמפליטודה גדולה. במידה ו"נעלים" פיקסלים אלו ונמיר את התמונה בחזרה נקבל את תמונת ההפרשים ללא רגישות יתר לשונות צבע ואור שמתקבלת בהשוואת מבנים והחסרת תמונה. "העלמת" הפיקסלים המחזוריים מתבצעת ע"י נרמול כל פיקסל בעצמו, כלומר שהאמפליטודה הופכת למטריצת יחידה ונשארו למעשה אך ורק עם תמונת הפאזה בהתמרת פורייה.

3.3. שיטות ללא השוואה

שיטות ללא השוואה אינן זקוקות לתמונת דגם תיאורטי להשוואה. הן יוצאות מנקודת הנחה שיש לבדוק האם המעגל המודפס תקין באופן מוחלט ע"י בדיקה האם הוא מתאים לדרישות התכנון שלו. שיטות אלו מתבססות על ידע מהם קווי היסוד של מעגל מודפס שכזה ובודקות האם המעגל המודפס הספציפי עונה לקווי היסוד הללו. מכיוון שהטכנולוגיה היום מאפשרת ייצור בממדים מזערניים אזי תמונה של מעגל מודפס מכילה מידע רב על מספר רב של פיקסלים ומכיוון שניתוח תמונה ברזולוציה מלאה הינו תהליך יקר הן מבחינת משאבי החישוב והן מבחינת הזמן, לרוב תהליך הניתוח יתבצע על איזשהו ייצוג מצומצם יותר של התמונה.

1.3.3. בדיקת היוצא דופן

סוג אחד של שיטות ללא השוואה הינו בדיקת היוצא דופן. הנחת היסוד של שיטות אלה היא שמעגל מודפס סטנדרטי מושתת על רכיבים בסיסיים שמרכיבים את המעגל וכל רכיב בנוי ממספר צורות יסודיות בעוד שהפגמים לרוב אינם הרכבה של צורות יסודיות אלא איזושהי צורה יוצאת דופן. בהתבסס על הנחה זו, אנו מנסים לחפש את הצורות היוצאות דופן במעגל ומסווגים אותן כפגמים. החיסרון העיקרי של שיטות אלו הוא שאם המעגל המודפס או התקלות שבו סוטים במעט מהנחת היסוד אזי השיטות לא עובדות. סטייה מהנחת היסוד של שיטות אלה אינה איזושהי תופעה מאוד נדירה אלא משהו שבהחלט יכול לקרות.

2.3.3. בדיקת תכנון

צורה אחרת של שיטות ללא השוואה הינה בדיקת התכנון. כאשר מתכננים מעגל מודפס ישנם כמה קווי יסוד שתלויים בטכנולוגיית הייצור אשר המעגל צריך לעמוד בהם. דוגמה אחת לקו יסוד שכזה הוא רוחב מינימאלי של קו מוליך. אם מוליך יחרוג ממינימום זה, הרי שהוא יישרף או יתחמם על יתר המידה. אם כן, הנחת היסוד של שיטת בדיקת התכנון היא שישנם קווי יסוד בתכנון המעגל המודפס ואנו רוצים לבדוק כי אכן המעגל הספציפי תואם ועונה לקווי היסוד הללו. על מנת לבצע בדיקה זו אין לנו צורך במודל תיאורטי וכל שעלינו לעשות הוא לבצע ניתוח על תמונת המעגל הספציפי.

דוגמאות לקווי יסוד תכנוניים אשר נבדקים בבדיקה זו הם:

- קוטר מינימאלי ומקסימאלי של נקודות החיבור (pads)
- קוטר מינימאלי ומקסימאלי של חורים
- רוחב מינימאלי ומקסימאלי של קווי הולכה
- מרווחים בין מבנים/מוליכים

בדיקות אלו מתבצעות לרוב ע"י ביצוע פעולות מורפולוגיות מקומיות אשר יתוארו בסעיפים הבאים.

4.3. שיטות משולבות

כמו הרבה דברים בעולם, הפתרון המנצח הוא לרוב שילוב של פתרונות בסיסיים. גם בעולם הבעיה של מציאת פגמים במעגלים מודפסים השיטות הנפוצות והמצליחות יותר הינן שיטות אשר משלבות בין השיטות הבסיס שצוינו לעיל. בהינתן כי לכל שיטה ישנן יתרונות וחסרונות, אזי השיטות המשולבות מנסות לקחת את הטוב מכל שיטה. כל שיטה משולבת מבצעת צירוף כלשהו בין שיטות הבסיס שצוינו לעיל. בסעיף זה אתמקד בתיאור של שיטה משולבת אחת בתור דוגמה, אם כי כפי שציינתי ניתן למצוא מספר צירופים בספרות.

דוגמה:

נגדיר שיטת לבדיקת מעגל מודפס כדלקמן: השיטה תשווה רשימה מוגדרת של מבנים אשר באה מקובץ התכנון של המעגל למבנים אלו על המעגל המודפס. כאשר ימצא פגם כלשהו במבנה מסוים אזי נבצע בדיקת תכנון על האזור סביב המבנה התקול.

בשיטה זו אנו משתמשים חלקית בשיטת השוואת מבנים, הווה אומר שיטה זו משויכת מצד אחד לשיטות השוואה. בשיטה זו אנו מבצעים בדיקות תכנון על חלק מהאזורים, הווה אומר שיטה זו משויכת מצד שני לשיטות ללא השוואה. למעשה לקחנו היבט אחד משיטות ללא השוואה והיבט אחר משיטות השוואה ויצרנו איזושהי שיטה משולבת.

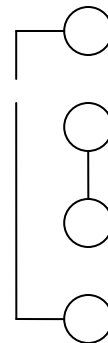
מכיוון שהשיטה אינה פועלת על הדגם התיאורטי פיקסל אחר פיקסל אנו חוסכים את בעיות האי-תאימות הגיאומטרית ומקום אחסון גדול לתמונות. היבט נוסף הוא שמכיוון שרשימת המבנים הצפויים מגיעה מקובץ התכנון אזי שיטה זו תהיה חזקה יותר מבדיקת השוואה פשוטה שכן היא תוכל לגלות מבנים חסרים, מבנים מיותרים וליהנות ממהירות ביצוע. לאחר מציאת הפגמים הראשונית אנו מסוגלים להתמקד בבדיקות תכנון באזורים שהם בעלי סיכוי גדול יותר להיות תקולים שכן התגלה בהם לפחות פגם אחד.

שלב ראשון בשיטה זו יהיה להפוך את התמונה הנבדקת לתמונת מבנים. שלב זה יעשה באמצעות הפעלת מספר פעולות מורפולוגיות שיתוארו בסעיפים הבאים.

התמונה הבאה:



תהפוך למפת המבנים הבאה:



איור 4 : מפת מבנים

וכך את מפת המבנים הנ"ל נוכל להשוות בחלקה או במלואה לקובץ התכנון ולגלות בנוסף לקווי היסוד של התכנון האם חסרים מבנים או נוספו מבנים.

4. פעולות מורפולוגיות

הפעולות המורפולוגיות הן קבוצה של פעולות עיבוד תמונה אשר מבוצעות על תמונות ומבוססות על צורות. בפעולה מורפולוגית הערך של כל פיקסל בתמונת הפלט הינה פעולה מתמטית על ערך הפיקסל עצמו וערכי הפיקסלים אשר בסביבתו. הגדרתה של הפעולה המורפולוגית מורכבת משני מרכיבים. הראשון הינו הגדרת הפעולה המתמטית. דוגמה לפעולה מתמטית שכזו היא הפעולה הלוגית AND. המרכיב השני הינו הגדרת הפיקסלים אליהם נתייחס בחישוב הפעולה המתמטית, או כפי שנהוג לכנות זאת, סביבת הפיקסלים. דוגמה לסביבת הפיקסלים תהיה הפיקסלים השכנים לפיקסל הנבדק במרחק של לא יותר מפיקסל אחד. "כרסום" ו-"הרחבה" הינן פעולות היסוד המורפולוגיות היחידות. את כל הפעולות המורפולוגיות האחרות ניתן להרכיב מ"כרסום" ו"הרחבה".

1.4.1 כרסום (Erosion)

בפעולה זו כל פיקסל בתמונת הפלט מקבל את ערך המינימום של הסביבה בתמונת הקלט. בתמונות הבינריות כאשר אנו בודקים פיקסל מסוים ומסתכלים על סביבתו אזי אם אחד משכניו של פיקסל זה ערכו 0 אזי הפיקסל מקבל ערך 0, שכן ערך המינימום של הסביבה היה 0. לרוב הסביבה בה משתמשים הינה מלבן כלשהו. כאשר אנו רוצים לחשב את ערך הפיקסלים אשר נמצאים בקצוות התמונה אזי נתקל בבעיה שכן בתמונת הקלט אין סביבה מלאה כפי שיש לפיקסלים במרכז התמונה. כדוגמה לפיקסל בפניה ימנית עליונה בתמונה אין פיקסלים מימינו שנוכל להתחשב בהם כאשר נתייחס לסביבה מלבנית סביבו. אי לכך בכל פעם כאשר צריך להתייחס לפיקסל שהוא לכאורה מחוץ לתמונה יש להתייחס כאילו ערכו הערך המקסימאלי המותר, כלומר בתמונת אפור, גוון 255 ובתמונה בינרית 1.

להלן דוגמה של פעולת כרסום על תמונת בינרית עם סביבה של 3x3. משמעות הדבר כי נתייחס עבור כל פיקסל לשכנים שנמצאים מסביבו במרחק של לא יותר מפיקסל אחד כמתואר במטריצה הבאה:

| | | |
|-------|------------|-------|
| שכן 2 | שכן 1 | שכן 8 |
| שכן 3 | פיקסל נבדק | שכן 7 |
| שכן 4 | שכן 5 | שכן 6 |

כל הפיקסלים המסומנים בצהוב אינם חלק מתמונת הקלט אך כאשר אנו זקוקים להתייחס לסביבה מחוץ לתמונה נתייחס כאילו היה ערכה 1:

| | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

קלט:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

פלט:

איור 5 : דוגמה לכרסום

ספציפית עבור סביבה שכזאת (3x3) ניתן ליעל את החישוב ע"י הפעלה של כרסום פעם אחת עם סביבה של 3x1 ופעם נוספת עם סביבה של 1x3, וזאת במקום פעם אחת עם סביבה של 3x3. ניקח את הדוגמה לעיל ונבדוק מדוע זה יותר יעיל לבצע את הכרסום עם שני סביבות יותר קטנות. עבור כל פיקסל בתמונה ביצענו השוואה למטריצה 3x3, כלומר 9 השוואות. סה"כ $42 \times 9 = 378$ השוואות (42 הינו מספר הפיקסלים בתמונה). כפי שציינתי ניתן לבצע את אותה הפעולה ע"י שני מעברים, הראשון יהיה עם המטריצה 3x1 על התמונה. מעבר זה יתבטא ב- $42 \times 3 = 126$ השוואות. המעבר השני יהיה עם המטריצה 1x3 על התמונה שנוצרה מהמעבר הראשון, כלומר $42 \times 3 = 126$ השוואות. סה"כ נבצע $126 + 126 = 252$ השוואות במקום 378.

נסמן את הכרסום כ- $A \otimes B$ כאשר A הינה תמונת הקלט ו-B מייצגת את הסביבה הרצויה. לרוב B מייצג מלבן בגודל MxN פיקסלים. ניתן לחזור על פעולת הכרסום ולקבל פעולת כרסום בעומק כלשהו (ראה מקורות [8], [9], [8]).

2.4 הרחבה (Dilation)

בפעולה זו כל פיקסל בתמונת הפלט מקבל את ערך המקסימום של הסביבה בתמונת הקלט. בתמונות הבינריות אם פיקסל כלשהו בסביבה בתמונת הקלט הינו אחד אזי הפיקסל מקבל ערך 1. לרוב הסביבה בה משתמשים הינה מלבן כלשהו. כאשר אנו רוצים לחשב את ערך הפיקסלים אשר נמצאים בקצוות התמונה אזי נתקל בבעיה שכן בתמונת הקלט אין סביבם סביבה מלאה כפי שיש לפיקסלים במרכז התמונה. כדוגמה לפיקסל בפנינה ימנית עליונה בתמונה אין פיקסלים מימינו שנוכל להתחשב בהם כאשר נתייחס לסביבה מלבנית סביבו. אי לכך בכל פעם כאשר צריך להתייחס לפיקסל שהוא לכאורה מחוץ לתמונה יש להתייחס כאילו ערכו הערך המינימאלי המותר, כלומר בתמונת אפור, גוון 0 ובתמונה בינרית 0. להלן דוגמה של פעולת כרסום על תמונת בינרית עם סביבה של 3x3. כל הפיקסלים המסומנים בצהוב אינם חלק מתמונת הקלט אך כאשר אנו זקוקים להתייחס לסביבה מחוץ לתמונה נתייחס כאילו היה ערכה 0:

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

קלט:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

פלט:

איור 6 : דוגמה להרחבה

ספציפית עבור סביבה שכזאת ניתן ליעל את החישוב ע"י הפעלה של כרסום פעם אחת עם סביבה של 3×1 ופעם נוספת עם סביב של 1×3 , וזאת במקום פעם אחת עם סביבה של 3×3 , כפי שתואר בסעיף הכרסום לעיל.

נסמן את ההרחבה כ- $A \oplus B$ כאשר A הינה תמונת הקלט ו- B מייצגת את הסביבה הרצויה. לרוב B מייצג מלבן בגודל $M \times N$ פיקסלים. ניתן לחזור על פעולת ההרחבה ולקבל פעולת הרחבה בעומק כלשהו (ראה מקורות [8], [9], [8]).

3.4. פתיחה (Opening)

הפתיחה הינה פעולה מורפולוגית שמורכבת משתי הפעולות היסודיות של כרסום והרחבה. הפתיחה היא הפעלת פעולת כרסום ולאחריה פעולת הרחבה עם סביבה זהה לזו שהופעלה בפעולת הכרסום. הפעולה נקראת פתיחה משום שפעולת הכרסום המתבצעת ראשונה גורמת לקווים "דקים" או מקוטעים להעלם ולאחר מכן מכיוון שהם אינם קיימים פעולת ההרחבה לא מחזירה אותם ומקבלים סוג של פתיחת מבנים בתמונה.

להלן דוגמה של פעולת פתיחה על תמונה בינרית עם סביבה של 3×3 :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

קלט:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

פלט:

איור 7 : דוגמה לפתיחה

נסמן את הפתיחה כ- $A \circ B = (A \ominus B) \oplus B$ כאשר A הינה תמונת הקלט ו-B מייצגת את הסביבה הרצויה (ראה מקורות [8], [9]).

4.4 סגירה (Closing)

הסגירה הינה פעולה מורפולוגית שמורכבת משתי הפעולות הבסיסיות של כרסום והרחבה. הסגירה היא הפעלת פעולת הרחבה ולאחריה פעולת כרסום עם סביבה זוהי לזו שהופעלה בפעולת ההרחבה. הפעולה נקראת סגירה משום שפעולת ההרחבה המתבצעת ראשונה גורמת לקווים "דקים" או מקוטעים להתרחב ולהתחבר לצורות שכנות ולאחר מכן מכיוון שהם נמצאים בתוך מקטע גדול פעולת הכרסום לא מעלימה אותם ומקבלים סוג של סגירת מבנים בתמונה.

להלן דוגמה של פעולת סגירה על תמונה בינרית עם סביבה של 3×3 :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

קלט:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

פלט:

איור 8 : דוגמה לסגירה

נסמן את הסגירה כ- $A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B$ כאשר A הינה תמונת הקלט ו-B מייצגת את הסביבה הרצויה (ראה מקורות [8], [9]).

5.4 פגע או החטא (Hit or miss)

פגע או החטא הינה פעולה מורפולוגית שמטרתה לחפש תבניות של פיקסלים בתמונה. הסביבה אשר בשימוש בפעולה זו הינה הרחבה מסוימת של הסביבה אשר השתמשנו בפעולות הכרסום והרחבה. נסמן את הסביבה הבאה כ-C:

| | | |
|---|---|---|
| - | 1 | - |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | - |

משמעותה כי פיקסלים המסומנים כ-1 צריכים להיות תואמים לערכי 1 בתמונה, פיקסלים המסומנים כ-0 צריכים להיות תואמים לערכי 0 בתמונה ופיקסלים אשר אינם מסומנים בסביבה (סימון '-') אינם נלקחים בחשבון. במידה וישנה התאמה, אזי ערך הפיקסל הוא 1 ואם לאו 0.

להלן דוגמה של פעולת פגע או החטא עם הסביבה C:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

קלט:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

פלט:

איור 9: דוגמה לפעולת פגע או החטא

נפרק את תאור הפעולה לשתי פעולות יותר בסיסיות.
בהינתן המטריצה C:

| | | |
|---|---|---|
| - | 1 | - |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | - |

אנו רוצים לקבל ערך 1 כאשר החזית מתאימה למטריצה C₁:

| | | |
|--|---|---|
| | 1 | |
| | 1 | 1 |
| | | |

וכאשר הרקע מתאים למטריצה C₂:

| | | |
|---|---|--|
| | | |
| 0 | | |
| 0 | 0 | |

את דרישת ההתאמה ל-C₁ ניתן לתאר כ- $A \Theta C_1$.
את דרישת ההתאמה ל-C₂ ניתן לתאר כ- $A^c \Theta C_2^c$, כאשר A^c הינה המטריצה המשלימה של A.
עבור מטריצה בינרית משמעות הדבר היא כי כל פיקסל בעל ערך 1 הופך ל-0 וההפך.

מכיון שיש לענות על שתי הדרישות אזי ניתן לנסח את המקרה הפרטי שתיארנו כ-
 $(A \Theta C_1) \cap (A^c \Theta C_2^c)$

באופן כללי פעולת פגע או החטא מוגדרת כדלהלן (ראה מקורות [8], [9], [8]):
 $A * B = (A \Theta B_1) \cap (A^c \Theta B_2)$

6.4 דיקוק (Thinning)

הדיקוק הינו פעולה מורפולוגית שמטרתה לכרסם בעוביים של המבנים מבלי לתת להם להעלם. דיקוק מוגדר כדלהלן:

$$A \otimes B = A - (A * B) = A \cap \overline{(A * B)}$$

בחירת הסביבה B_1 ו- B_2 משמעותית לתוצאות הדיקוק.

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

הפעלת פעולת דיקוק עם הסביבה

על התמונה:

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

תניב (השינוי הוא בפיקסל אחד המודגש) :

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

איור 10 : דוגמה לדיקוק

נעקוב כעת אחרי ביצוע פעולה זו שלב אחר שלב. השלב הראשון הוא חישוב פגע או החטא: $A * B$ כאשר B הינה המטריצה הבאה:

| | | |
|---|---|---|
| 0 | 1 | - |
| 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | - |

כלומר את B נייצג ע"י B_1 :

| | | |
|--|---|---|
| | 1 | |
| | 1 | 1 |
| | | |

וע"י B_2 :

| | | |
|---|---|--|
| 1 | | |
| 1 | | |
| 1 | 1 | |

כפי שתואר בסעיף הקודם: $A * B = (A \ominus B_1) \cap (A^c \ominus B_2)$.

נחשב כעת את $A \oplus B_1$ ולהלן התוצאה (כרסום של A עם המבנה B_1)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

המשלים ל-A הינו:

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

כעת נחשב את המשלים לפגוע או החטא, (A^*B) :

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

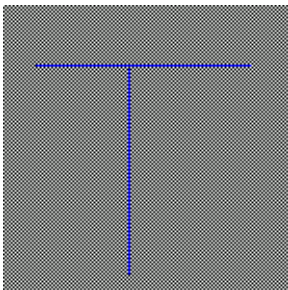
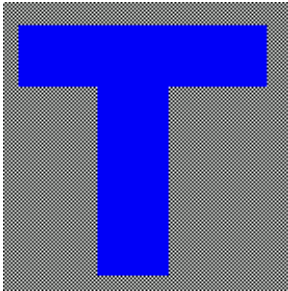
וכעת נבצע את השלב האחרון, $A \otimes B = A \cap (\overline{A^*B})$, ונקבל את תוצאת הדיקוק

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

7.4. שילוד (Skeletonization)

ההגדרה הלא פורמאלית לשילוד הינה תהליך המפחית את מספר הפיקסלים בעלי ערך 1 בתמונה בינארית עד לקבלת שלד בעל עובי מינימלי (פיקסל אחד) המשמר את הטופולוגיה של העצם המתואר בתמונה. זהו תהליך ש"מקלף" פיקסלים מהאובייקט המתואר בתמונה, ככל שניתן, מבלי לפגוע בצורה הכללית של העצם בתמונה. לאחר שהתהליך הסתיים אזי עדיין נוכל לזהות את העצם בתמונה והוא יהיה בעל המאפיינים הבאים: דק ככל שניתן (לרוב פיקסל אחד), רציף וממורכז.

לדוגמה השלד של העצם הבא:



איור 11 : דוגמה לשילוד [14]

ההגדרה הפורמאלית של שילוד הינה:

$$(1) : Skeleton = S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A)$$

$$(2) : S_k(A) = (A \ominus k B) - (A \ominus k B) \circ B$$

$$(3) : A \ominus k B = (...((A \ominus B) \ominus B) \ominus ...) \ominus B$$

$$(4) : K = \max\{k \mid (A \ominus k B) \neq \phi\}$$

מציאת השלד הינה פעולה חזרתית. מספר החזרות שיש לבצע על מנת לחשב את השלד הינו כמספר הכרסומים הדרושים על מנת להגיע לתמונה ריקה. אמירה זו מתבטאת בנוסחה (4).
בכל חזרה תמונת הבסיס בה נשתמש הינה כרסום k פעמים של התמונה המקורית, כאשר k הינו מספר החזרה. אמירה זו מתבטאת בנוסחה (3).
בכל חזרה ניצור תת שלד S_k , כאשר תת שלד S_k נוצר על ידי כרסום התמונה k פעמים (נוסחה 3) ומציאת ההבדלים מול כרסום התמונה k פעמים ולאחריה פתיחה.
השלד הינו איחוד תוצאות כל החזרות. אמירה זו מתבטאת בנוסחה (1).

5. אלגוריתם לבדיקת מעגלים מודפסים עבור תמונות דחוסות

בסעיפים הבאים אני אתאר אלגוריתם לבדיקת מעגלים עבור תמונות דחוסות. אלגוריתם מורכב ממידע שאספתי ממספר מאמרים בנושא (מקורות [6], [4], [11], [12]). אלגוריתם זה בבסיסו הוא אלגוריתם על פי שיטת השוואת מבנים (סעיף 3.2.2). השלבים מהם מורכב האלגוריתם הינם:

- מציאת מבנים בתמונה.
- השוואת המבנים בתמונה למבני הבסיס.
- סינון פגמים אשר התגלו בהשוואה הנ"ל.

בסעיפים הבאים אני מתאר את השלבים השונים של האלגוריתם, בצירוף הערות פרקטיות אשר חוויתי כאשר מימשתי את האלגוריתם.

1.5 דחיסת RLE (Run Length Encoding)

RLE הינה שיטת דחיסת מידע פשוטה. עקרון השיטה הוא לייצג נתונים אשר חוזרים על עצמם כאלמנט אחד אשר מציין את הערך של הנתון, מספר החזרות ובכך לחסוך את המקום שציון הנתון שוב ושוב היה צורך. שיטה זו, מעצם עקרון פעולתה, טובה כאשר הנתונים אותם רוצים לדחוס חוזרים על עצמם בצורה זו או אחרת. דוגמאות לאובייקטים אותם יהיה מוצלח לדחוס באמצעות שיטה זו הם גרפים, אנימציות. דוגמה לאובייקט אותו אין זה מוצלח לדחוס באמצעות שיטה זו הוא קובץ, שכן לרוב לא נמצא חזרות רבות שיהפכו את הדחיסה ליעילה.

נניח כי אנו רוצים לדחוס את סדרת הנתונים הבאה:

WWWWWWWWTTTYPWWWW

בשיטת RLE, כפי שכבר ציינתי, נתון אשר חוזר על עצמו ייוצג כאלמנט אשר מציין את ערך הנתון ומספר החזרות. להלן ייצוג ה-RLE של סדרה זו:

9 time W, 3 times T, 1 time Y, 1 time P, 5 times W

או בצורה קצת יותר נוחה:

(W, 9), (T, 3), (Y, 1), (P, 1), (W, 5)

בעבודה זו אנו נעבד תמונות בינריות. עובדה זו אינה משנה את אופן הדחיסה בשיטת RLE. בהינתן הסדרה הבינרית הבאה:

00001100001101011111000000

להלן ייצוג הסדרה, דחוסה בשיטת RLE :

(0, 4), (1, 2), (0, 4), (1, 2), (0, 1), (1, 1), (0, 1), (1, 6), (0, 6)

ניתן לראות כי כל איבר מייצג סדרת נתונים שהיא תת סדרה של הסדרה הבינרית המלאה וכי רצף האיברים מייצג את סדרת הנתונים המלאה.

2.5. אלגוריתם לחלוקת התמונה למקטעים המכילים צורות בסיסיות

אלגוריתם זה מבוסס על מקורות [4] ו-[6]. השלב הראשון באלגוריתם למציאת הפגמים אותו אנו בוחנים בעבודה זו הינו מציאת המבנים בתמונת המעגל המודפס. להלן תיאור אלגוריתם לחלוקת התמונה למקטעים המכילים צורות בסיסיות (מבנים). אלגוריתם זה בנוי על חלוקת התמונה לחלונות כאשר בכל חלון נמצאת צורה בסיסית. הקו המנחה לאלגוריתם הינו שהוא מתחיל מחלונות מסוימים ("זרעים" של חלונות). אם חלון מכיל צורה בסיסית אחת אזי עיבוד חלון זה נעצר. אם לא, אזי החלון משנה את צורתו עד שהוא נפסל או הופך לחלון תקין. הנחות היסוד של האלגוריתם הינן שאנו יודעים מהן הצורות הבסיסיות שיכולות להופיע במעגל המודפס.

מונחים

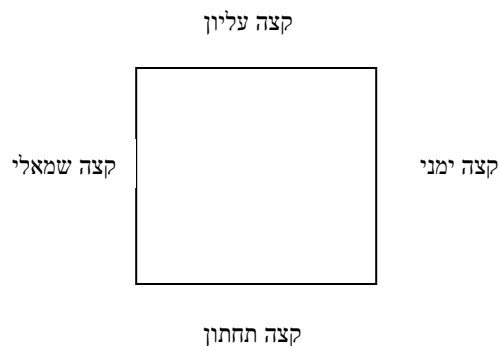
מעבר בתמונה דחוסה RLE – מעבר בתמונה דחוסה RLE הינו מעבר בין איבר אחד ברצף האיברים של תמונה דחוסה RLE לבין האיבר הבא ברצף האיברים של תמונה דחוסה RLE. לדוגמה עבור רצף האיברים הבא:

(0, 4), (1, 2), (0, 4), (1, 2), (0, 1), (1, 1), (0, 1), (1, 6), (0, 6)

ישנם שמונה מעברים:

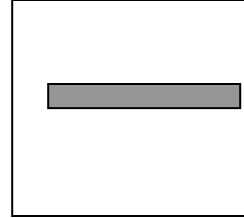
- מעבר ראשון: $(0, 4) \rightarrow (1, 2)$
- מעבר שני: $(1, 2) \rightarrow (0, 4)$
- מעבר שלישי: $(0, 4) \rightarrow (1, 2)$
- מעבר רביעי: $(1, 2) \rightarrow (0, 1)$
- מעבר חמישי: $(0, 1) \rightarrow (1, 1)$
- מעבר שישי: $(1, 1) \rightarrow (0, 1)$
- מעבר שביעי: $(0, 1) \rightarrow (1, 6)$
- מעבר שמיני: $(1, 6) \rightarrow (0, 6)$

כפי שתואר לעיל האלגוריתם מחלק את התמונה לחלונות כלשהם, כאשר כל חלון מכיל ארבעה קצוות.

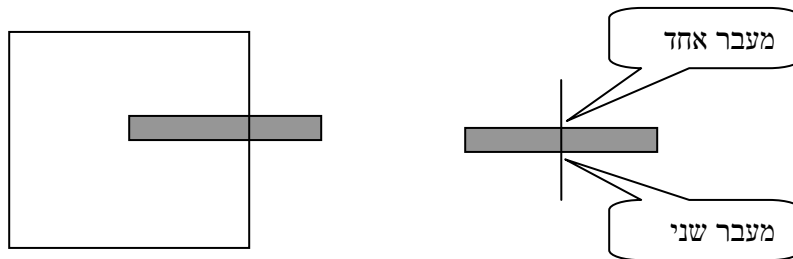


האלגוריתם מסווג את סוגי קצוות החלון כדלהלן

קצה ריק (blank edge, TYPE₀) – קצה חלון אשר מכיל 0 מעברים בצורתו הדחוסה (RLE) ומורכב מערכי 0 (כלומר רקע). משמעות הדבר כי אף צורה אינה "חותכת" את קצה זה של החלון. בדוגמה שלהלן ניתן לראות כי הצורה אשר נמצאת התוך החלון אינה "חותכת" אף אחד מקצוות החלון ולכן כל קצוות החלון (עליון, תחתון, שמאלי וימני) הינם קצוות ריקים לפי הגדרה שלעיל:



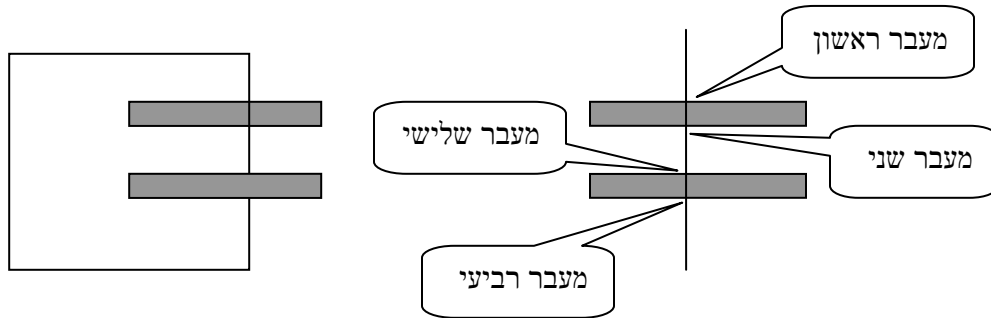
קצה עם חתך אחד (single trace edge, TYPE₁) – קצה חלון אשר מכיל שני מעברים בצורתו הדחוסה (RLE) ומתחיל עם ערכי 0 (כלומר רקע). משמעות הדבר שצורה אחת בלבד "חותכת" את קצה זה של החלון. בדוגמה שלהלן ניתן לראות כי הצורה "חותכת" את קצה החלון הימני ולכן קצה זה יסווג כקצה עם חתך אחד ואילו כל שאר הקצוות (עליון, תחתון ושמאלי) יסווגו כקצוות ריקים:



איור 12 : קצה עם חתך אחד

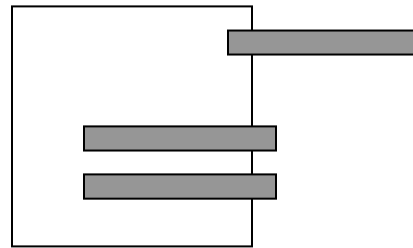
קצה עם חתך כפול (double trace edge, TYPE₂) – קצה חלון אשר מכיל ארבעה מעברים בצורתו הדחוסה (RLE) ומתחיל עם ערכי 0 (כלומר רקע). משמעות הדבר ששתי צורות בלבד "חותכות" את קצה זה של החלון.

בדוגמה שלהלן ניתן לראות כי ישנן שתי צורות אשר "חותכות" את קצה החלון הימני ולכן קצה זה יסווג כקצה עם חתך כפול ואילו כל שאר הקצוות (עליון, תחתון ושמאלי) יסווגו כקצוות ריקים:



איור 13: קצה עם חתך כפול

קצה לא תקין – קצה חלון אשר אינו תואם לאחת מהגדרות קצה חלון שהוזכרו לעיל. בדוגמה שלהלן קצה החלון הימני מכיל שלושה חתכים. הוא לא קצה ריק, הוא לא קצה עם חתך אחד, הוא לא קצה עם חתך כפול ולכן הוא יסווג כקצה לא תקין.

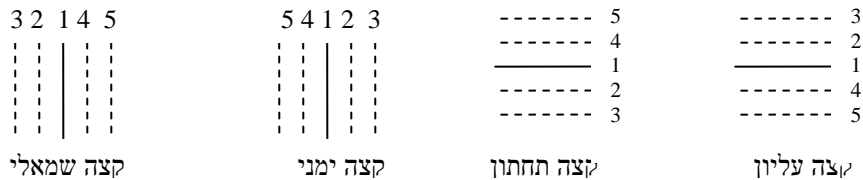


אלגוריתם לחלוקת התמונה למקטעים המכילים צורות בסיסיות

- נחלק את התמונה ל"רשת" ריבועית.
- נסמן ב- W_{ij} את החלון במיקום i, j ב"רשת".
- נסמן ב- S_{ijk} את קצה k של החלון W_{ij} .
- $k=0$, יתייחס לקצה השמאלי
- $k=1$, יתייחס לקצה הימני
- $k=2$, יתייחס לקצה העליון
- $k=3$, יתייחס לקצה התחתון

נגדיר קצה תקין כקצה מסוג קצה ריק, קצה עם חתך אחד או קצה עם חתך כפול.

- חלק את התמונה לחלונות שווי גודל ("רשת" ריבועית פשוטה).
- עבור כל חלון W_{ij}
 - עבור כל קצה S_{ijk}
 - אם קצה זה אינו מסוג קצה ריק או קצה עם חתך אחד בצע הזזה של הקצה. חזור על שלב זה עד אשר הקצה הינו קצה ריק או קצה עם חתך אחד או לחלופין לא ניתן לבצע יותר הזזות. מספר ההזזות שניתן לבצע וכיוונן תלוי ברזולוציית המעגל. לדוגמה אם מרחק טיפוסים בין קווים במעגל עומד על 5 פיקסלים אז משמעות הדבר שאין טעם לבצע הזזות יותר מ-2 פיקסלים לכל כיוון. במהלך עבודה זו נעבוד עם 4 הזזות אפשריות, שתיים להרחבת החלון ושתיים להקטנתו כמתואר באיור 14. המספור שמופיע באיור מתאר את סדר בדיקת ההזזות. באופן כללי תמיד ננסה להרחיב את החלון ובמידה והזזות אלו לא יצרו חלון תקין אזי ננסה להקטין את החלון. כדוגמה ניקח את הקצה שמאלי, ההזזה הראשונה תהיה שמאלה (מספר 2), ההזזה הבאה שמאלה (מספר 3) ולאחר מכן נבצע הזזות שיקטינו את החלון, הזזות 4 ו-5.
 - אם כל הקצוות תקינים אזי החלון תקין ואם לאו סמן חלון שאינו תקין.



איור 14: סוגי הזזות לקצה חלון

כפי שניתן לראות השאילתא הדומיננטית באלגוריתם זה הינה "מהו סוג קצה החלון". אפיון סוג קצה החלון מתבצע על ידי ניתוח מספר המעברים בתמונה. אפס מעברים משמעם קצה ריק, שני מעברים משמעם קצה עם חתך אחד, ארבעה מעברים משמעם קצה עם חתך כפול וכל מספר מעברים אחר משמעם כי הקצה אינו תקין. בתמונה בינרית הדחוסה בשיטת RLE קל מאוד לזהות את מספר המעברים ולכן נוז יהיה לממש אלגוריתם שכזה מעל לתמונה בינרית הדחוסה בשיטת RLE.

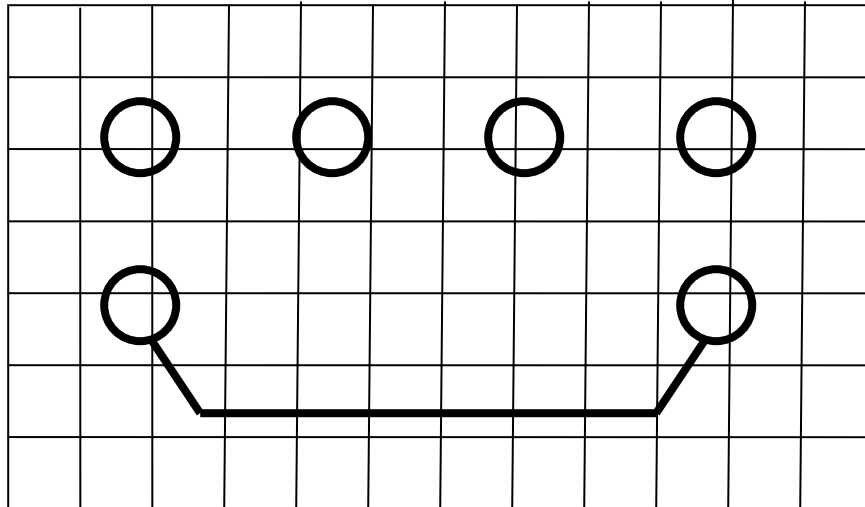
דוגמה:

בהינתן קו המיוצג בשיטת RLE

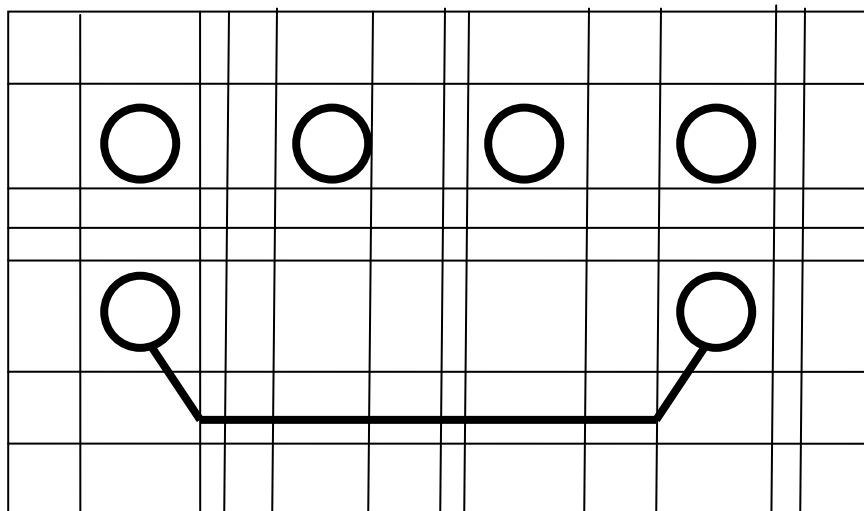
$(0, 5), (1, 8), (0, 6), (1, 9), (0, 7)$
אזי מספר המעברים הוא כמספר הרצפים פחות אחד, 4. מעבר ראשון מסדרת $(0,5)$ ל- $(1,8)$, מעבר שני מסדרת $(1,8)$ ל- $(0,6)$, מעבר שלישי מסדרת $(0,6)$ ל- $(1,9)$, מעבר רביעי מסדרת $(1, 9)$ ל- $(0, 7)$.

דוגמה:

"רשת" חלונות התחלתית שהושמה מעל לתמונה



"רשת" חלונות סופית שנבנתה על פי הקריטריונים של חלונות תקינים וקצוות תקינים



איור 15: רשת חלונות

3.5. השוואת צורות בסיסיות

השלב השני באלגוריתם למציאת הפגמים אותו אנו בוחנים בעבודה זו הינו השוואת צורות הבסיס אותן מצאנו בשלב הראשון לצורות הבסיס שנלקחו מתכנון המעגל. האלגוריתם תואר ברמה מופשטת במאמרים אותם קראתי (מקורות [6], [4], [11], [12]) ובסעיף זה ניסיתי לתאר את האלגוריתם יותר לעומק עם ההשלכות הפרקטיות שרלוונטיות למימוש. לאחר שחילקנו את המעגל המודפס לחלונות המכילים צורות בסיסיות אנו מעוניינים לבדוק כל צורה בסיסית ולחפש בה פגמים על ידי השוואה לצורת יחס שנלקחה מתכנון המעגל (צורה תיאורטית זו יכולה להיות מסופקת כקובץ שנגזר מתכנון המעגל). השוואת כל חלון לרצוי מתבצעת על ידי פעולת XOR פשוטה. מכיוון שהאלגוריתם אותו אנו בוחנים, מטרתו לעבוד ישירות מעל התמונה הדחוסה RLE אזי התנאים הבאים צריכים להתקיים:

1. על החלון הנבדק להיות מיוצג בצורה דחוסה RLE.
 2. על צורות היחס שנלקחו מקובץ התכנון להיות מיוצגות בצורה דחוסה RLE.
 3. כשלב מקדים לביצוע פעולת ה-XOR נצטרך למצוא את ההיסט בין החלון הנבדק לצורת היחס שכן לא מובטח כי הצורה הנבדקת ממורכזת בחלון הנוכחי ועל מנת לא לגלות פגמים מדומים כתוצאה מהיסט כלשהו עלינו לחשבו ולהתחשב בו. בנוסף לכך נצטרך למצוא את פקטור ההגדלה (Scaling) בין החלון הנבדק לבין צורת היחס שכן לא מובטח כי הצורה הנבדקת תהיה בדיוק של 100% באותו גודל של מבנה היסוד.
- תהליך ההשוואה יתבצע אך ורק על חלונות תקינים שנמצאו על פי האלגוריתם בסעיף הקודם. היתרון של שיטה זו שאנו לא מבצעים עיבוד על כל הפיקסלים אלא רק על אלו שמרכיבים את החלקים החשובים במעגל. החיסרון של שיטה זו שפגמים מסוג חוסר איכול בשטחים פתוחים לא יתגלו.

נדבך חשוב באלגוריתם ההשוואה המתואר בסעיף זה הוא ביצוע פעולת ה-XOR על גבי התמונה הדחוסה ועבור חלון מסוים. להלן תיאור האלגוריתם לביצוע תהליך זה.

הנחות

- התמונה שנרכשה הינה ישרה ובאותה מערכת צירים שבה נמצאות צורות היחס מקובץ התכנון.
- במציאות הנחה זו אינה נכונה אך מתגברים עליה ע"י ביצוע שלב של יישור זוויתי (alignment), יישור היסט (registration) ויישור גודל (Scaling).

אלגוריתם השוואת צורות הבסיס לחלונות שנמצאו

- עבור כל חלון תקין W_{ij}
 - בצע פעולת XOR מעל התמונה הדחוסה ולעומת תמונה הדחוסה של הצורה התיאורטית
 - רשום את הנקודות שקיבלו ערך 1 כפוטנציאל לפגם.

ביצוע פעולת XOR מעל תמונות דחוסות RLE

- אלגוריתם זה הינו חלק ממאמר [10] המתאר ביצוע פעולות מורפולוגיות מעל תמונה דחוסה RLE.
- נתונות שתי תמונות RLE שיש להשוות ביניהן
- חזור על הפעולות הבאות עד סוף המידע
 - אם אורך הסדרה הנוכחית בתמונה מספר 1 זהה לאורך הסדרה בתמונה מספר 2 וכמו כן ישנה זהות בערך הסדרה אזי עבור לסדרה הבאה.
 - במידה והגענו לשלב זה משמע הדבר כי אין התאמה מלאה בין הסדרות וכי ישנו הבדל, פגם פוטנציאלי. זיהוי מקטע הפגם הפוטנציאלי הוא מסוף הסדרה הקצרה

מבין שתי התמונות, שכן בנקודה זו מתחיל להיות הבדל בין שתי התמונות. נסמן את התמונה בה התגלתה הסדרה הקצרה יותר כ- I_1 ואת התמונה השנייה כ- I_2 . תחילת הפגם הינה סוף סדרה I_1 . סוף הפגם הינו הנקודה הקרובה ביותר מבין סוף הסדרה הבאה בתמונה I_1 וסוף הסדרה הנוכחית ב- I_2 .

דוגמה:

מטרת דוגמה זו היא להמחיש איך ביצוע פעולת XOR בין שתי תמונות דחוסות RLE תניב את תמונת ההבדלים בצורה דחוסה RLE. אינני מתייחס פה לחלונות העבודה שהוזכרו באלגוריתם לעיל שכן המשמעות היחידה לכך היא ביצוע XOR על תמונות קטנות (חלון).

נניח שיש לפנינו את התמונה הבאה:

```

0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0

```

ואנו רוצים להשוותה לתמונה הבאה:

```

0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0
0 0 0 1 1 1 0 1 1 1 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0

```


ייצוג התמונות ב- RLE הוא כדלהלן:

תמונה עליונה -

(0,7), (1,1), (0,15), (1,1), (0,15), (1,1), (0, 14), (1,3), (0,11), (1,3), (0,1), (1,3), (0,7),
(1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,7), (1,3), (0,1),
(1,3), (0,11), (1,3), (0,14), (1,1), (0,15), (1,1), (0,15), (1,1), (0,15), (1,1), (0,15),
(1,1), (0,15), (1,1), (0,9)

תמונה תחתונה -

(0,7), (1,1), (0,15), (1,1), (0,15), (1,1), (0, 14), (1,3), (0,11), (1,3), (0,1), (1,3), (0,7),
(1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,7), (1,3), (0,1),
(1,3), (0,11), (1,3), (0,14), (1,1), (0,15), (1,1), (0,14), (1,3), (0,13), (1,3), (0,13),
(1,3), (0,13), (1,3), (0,8)

נתחיל להשוות את התמונות על ידי השוואת האיברים בייצוג ה-RLE ואיתור האיבר הראשון בו יש הבדל. שתי הסדרות מתחילות באיבר (0,7) ובאיבר זה יש התאמה מוחלטת. אותו הדבר עבור האיבר (1,1) אשר בא אחרי (0,7). כך איבר אחר איבר מבצעים השוואה. שלושים וארבעה האיברים הראשונים זהים בין התמונה העליונה לתמונה התחתונה כדלהלן:

(0,7), (1,1), (0,15), (1,1), (0,15), (1,1), (0, 14), (1,3), (0,11), (1,3), (0,1), (1,3), (0,7),
(1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,5), (1,3), (0,7), (1,3), (0,1),
(1,3), (0,11), (1,3), (0,14), (1,1), (0,15), (1,1)

האיבר השלושים וחמישה שונה. בתמונה העליונה הוא (0,15) ואילו בתמונה התחתונה הוא (0,14). מכיוון שאיבר זה שונה באורכו, (0,14) בתמונה התחתונה לעומת (0,15) בתמונה העליונה, אזי פה זוהה פגם. במקרה זה אורכו הוא אחד (14-15=1). השלב הבא הוא לבצע השוואה בין השארית של הסדרה (0,15) שהיא (0,1), לבין הסדרה הבאה בתמונה התחתונה שהיא (1,3). השוואה זו תניב פגם פוטנציאלי נוסף. וכך הלאה ההשוואות ממשיכות.

4.5 סינון פגמים מתמונת ההבדלים

השלב האחרון באלגוריתם למציאת הפגמים אותו אנו בוחנים בעבודה זו הינו סינון הפגמים אשר התגלו בשלב הקודם שכן לא בהכרח כולם מעניינים. נושא זה הופיע בעיקר במקור [4]. תמונת ההבדלים חושפת כל הבדל ולו הקטן ביותר בין התמונה שרכשנו לבין תמונת היחס אליה ביצענו השוואה. הבעיה העיקרית של השוואה למודל תיאורטי הינה שלא כל הבדל מייצג תקלה פונקציונאלית. חלק מההבדלים נובעים מאיכות התמונה והדגימה, חלק מההבדלים נובעים מתמונה לא מיושרת (הן יישור זוויתי והן יישור כתוצאה מרעידות המכונה בזמן הדגימה). חלק מההבדלים אכן הינם פגמים, אך פגמים שלא יגרמו לתקלה פונקציונאלית. בשל הנזכר לעיל יש צורך לסנן את תמונת ההבדלים על מנת למצוא אך ורק את הפגמים המעניינים. לדוגמה, נניח כי לפנינו קו הולכה מסוים אשר כאשר רוחבו המתוכנן היה עשרה פיקסלים (המידות במיקרונים אינם רלוונטיות כעת), רוחבו האמיתי של קו ההולכה על המעגל המודפס הינו 9 פיקסלים וכי שינוי זה אינו מהותי שכן קו ההולכה הזה עדיין יעמוד ויתפקד בזרמים שעוברים דרכו. זהו מיקרה שבו תמונת ההבדלים תגלה הבדל בין התכנון לבין ההדפסה, אך הבדל זה לא יגרום לתקלה פונקציונאלית ולכן הוא אינו מעניין.

הפעלת פעולות מורפולוגיות הינה טכניקה נפוצה על מנת לפתור בעיה שכזו. לדוגמה על מנת למצוא רוחב קו מקסימאלי או מינימאלי משתמשים בפעולות כרסום והרחבה על תמונת המעגל המודפס. אנו נבצע פעולות דומות על תמונת ההבדלים וכך נסנן את הפגמים שאינם מעניינים. היתרונות של ביצוע פעולת הסינון על תמונת ההבדלים הינן:

1. העיבוד יכול להתבצע על מעט נתונים שכן מספר נקודות ההבדלים קטן משמעותית ממספר הפיקסלים בתמונה כולה.
2. מניתוח תמונת הבדלים אנו מגלים לא רק פגמים של חוסר התאמה ליסודות התכנון (כגון עובי קו) אלא גם פגמים של מבנים חסרים או מבנים מיותרים.

על מנת לסנן את הפגמים אנו נשתמש בביצוע פעולת כרסום על תמונת ההבדלים עם מבנים שונים. נסמן ב- $Difference$ את תמונת ההבדלים.

נסמן ב- SE_i את מבנה הכרסום i . כאשר כל מבנה כרסום שכזה מטרתו להשאיר בתמונת ההבדלים פגם מסוים (פגם עם מבנה מסוים). מספר מבני הכרסום הוא כמספר סוגי הפגמים אותם אנו רוצים לגלות.

עבור כל מבנה, SE_i , נפעיל את פעולת הכרסום עם מבנה זה על תמונת ההבדלים ונחבר את התוצאות עם חיבור OR לוגי. יש לבצע חיבור לוגי שכן כל פעולת כרסום תשאיר אך ורק פגמים מסוג מסוים. מכיוון שאנו מעוניינים לקבל בסופו של דבר תמונה עם מקבץ הפגמים מסוגים שונים אזי יש לבצע חיבור לוגי לכל פעולות הכרסום.

$$Defects = \bigcup_i Difference \otimes SE_i$$

כרסום תמונה עם מבנה מסוים, B , גורם לכך שרק מבנים בצורה וגודל זהה ל- B יישארו בתמונה.

לדוגמה תמונת הבדלים:

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

אם נבחר את המבנה הבא (B) לפעולת הכרסום אזי רק הבדלים בצורת המבנה ובגודלו יישארו בתמונה לאחר הכרסום.

| | | |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 |

להלן תוצאות הכרסום עם המבנה הנ"ל:

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

איור 17 : כרסום עם מבנה מסוים

מכיוון שפעולת כרסום משאירה בתמונה מבנים מצורה מסוימת בלבד (מבנים אשר תואמים למבנה הכרסום) ומכיוון שמעניינים אותנו פגמים בעלי גדלים שונים וצורות שונות אזי יש צורך לבצע את פעולת הכרסום שוב ושוב עם מבנים שונים (מבנה לכל סוג פגם אשר מעניין אותנו) ולאחד את תוצאות הכרסום לידי תמונת הבדלים מסוננת. בדוגמה שראינו לעיל היו בתמונת הבדלים מספר פגמים פוטנציאליים. בחירת מבנה הכרסום B גרמה לכך שסיננו והשארנו בתמונה אך ורק הבדלים בצורה ובגודל של B. במידה ואנו רוצים למצוא גם הבדל מסוג קו אלכסוני אזי היינו צריכים לבצע כרסום עם מבנה מתאים ולאחד את התוצאות עם הכרסום המקורי שנעשה עם מבנה B. ניתן להבין כי בחירת המבנים שאיתם תבצע פעולת הכרסום משמעותית לתוצאות הסופיות של מי מהפגמים מסונן ומי חשוב ונשאר. בנוסף לכך צורה מסוימת של פגם יכולה להיחשב משמעותית במעגל מודפס אחד ואילו במעגל מודפס אחר להיות לא מעניינת. בשל הסיבות הנ"ל עדיף לא לבחור קבוצה קבועה של מבנים אלא למצוא את המבנים שבהם כדאי להשתמש ע"י ניתוח תמונת המעגל והבנה מה יכול להיות פגם מעניין במעגל שכזה.

נניח כי אנו מעוניינים לבדוק את רוחב המוליכים ולמצוא מוליכים אשר שונים מעוביים המתוכנן בשני פיקסלים או יותר. בחירת מבנה הכרסום הבא:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |

תציף מקרים, בתמונת הבדלים, בהם הופיע קו בעל עובי מינימלי של שני פיקסלים וגובה מינימלי של חמישה פיקסלים, הווה אומר כל שונות בעובי המוליך משני פיקסלים ומעלה תתגלה.

5.5. פעולת כרסום על תמונה דחוסה RLE

פעולת כרסום הינה יקרה חישובית. דרך אחת לייצל חישוב זה הינו להשתמש בטבלאות חיפוש, אך אפילו שיטה זו אינה יעילה חישובית עם מבנים גדולים (גדולים מ-5X5). בסעיף זה אסביר איך ניתן לבצע פעולת כרסום על תמונה דחוסה RLE. אלגוריתם זה לא רק עובד על התמונה הדחוסה ובכך חוסך מקום אלא שהוא גם מהיר במבנים גדולים. האלגוריתם מבוסס על אלגוריתם בשם SKIPSM אשר מופיע ב-[13] ועל הלגוריתם התואר ב-[10].

להלן האלגוריתם:

- דחס את המבנה אותו אנו רוצים להשתמש בפעולת הכרסום בשיטת RLE.
- פעולת הכרסום משמעותה כי עבור כל פיקסל אנו משווים ומנסים למצוא התאמה בין מבנה הכרסום לבין הסביבה של הפיקסל הנבדק. כלומר עבור כל פיקסל בתמונה עלינו לבצע בדיקת התאמה למבנה הכרסום.
 - עבור כל פיקסל בצע:
 - גזור מהתמונה את סביבת הפיקסל, מיוצגת בדחיסת RLE, נסמן תמונה זו כ- I_1 .
 - נסמן את מבנה הכרסום כ- I_2 .
 - השווה את רצפי ה-RLE בתמונה I_1 לרצפי ה-RLE בתמונה I_2 כדלהלן:
 - אם אין התאמה בין הסדרה הנוכחית ב- I_1 לבין הסדרה הנוכחית ב- I_2 אזי אין התאמה, החזר ערך 0 עבור הכרסום.
 - אם הסתיימה השוואת הרצפים, אזי יש התאמה והחזר ערך 1 עבור הכרסום.
 - אם אורך הסדרה הנוכחית ב- I_1 זהה לאורך הסדרה ב- I_2 וכמו כן יש התאמה בערך הסדרה אזי עבור לסדרה הבאה.
 - אם אורך הסדרה הנוכחית ב- I_1 שונה מאורך הסדרה ב- I_2 אך יש התאמה בערך הסדרה אזי התקדם לסדרה הבאה בתמונה בה הסדרה קצרה יותר. בתמונה בה הסדרה ארוכה יותר, קצץ מאורך הסדרה את אורך הסדרה שהשוותה בשלב זה. כלומר אם אורך הסדרה הראשונה הוא 10 ואורך הסדרה השנייה הוא 7, אזי בתמונה אליה שייכת הסדרה השנייה יש להתקדם לסדרה הבאה ובתמונה עם הסדרה הראשונה יש לשנות את אורך הסדרה ל- $10-7=3$.

לדוגמה נניח שזה מבנה הכרסום אותו אנו רוצים להפעיל

0 – לבן
1 – לא משנה
2 – שחור

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

וכי זה מקטע מתמונת ההבדלים שאנו רוצים להפעיל עליו את מבנה הכרסום (או במילים אחרות לבדוק את התאמת מבנה הכרסום למקטע זה):

```

0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0
0 0 0 1 0 0 0
0 1 1 1 1 1 0
0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0

```

המבנה ניתן לייצוג ע"י הסדרה הבאה:

(1, 21), (2, 7), (1, 21)

המקטע הרלוונטי מיוצג ע"י הסדרה הבאה:

(0, 10), (1, 1), (0, 6), (1, 1), (0, 4), (1, 5), (0, 22)

ברצוננו לבדוק האם ישנה התאמה בין הסדרות ולשמ כך נשווה רצף לרצף.

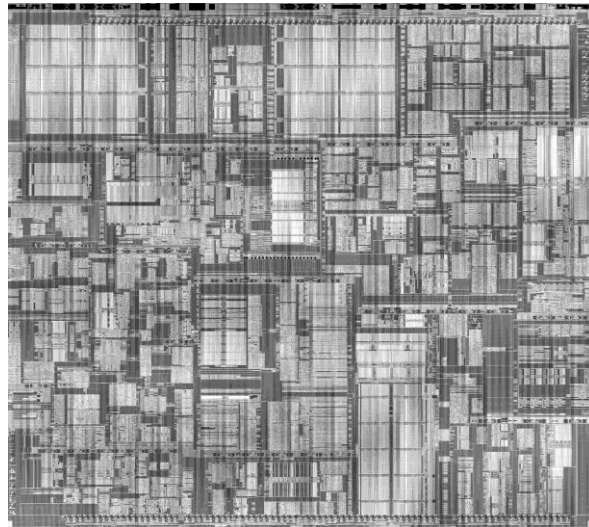
1. מבנה: (1, 11), (2, 7), (1, 21)
 תמונה: (0, 10)-Match Found, (1, 1), (0, 6), (1, 1), (0, 4), (1, 5), (0, 22)
 הושוו 10 פיקסלים עם ערך 0 בעוד שמבנה הכרסום דרש ערך כלשהו ולכן הרצף הראשון של המבנה קטן מ- 21 אברים ל- 10.
2. מבנה: (1, 10), (2, 7), (1, 21)
 תמונה: (0, 10), (1, 1)-Match Found, (0, 6), (1, 1), (0, 4), (1, 5), (0, 22)
 מבנה: (1, 4), (2, 7), (1, 21)
3. תמונה: (0, 10), (1, 1), (0, 6)-Match Found, (1, 1), (0, 4), (1, 5), (0, 22)
 מבנה: (1, 3), (2, 7), (1, 21)
4. תמונה: (0, 10), (1, 1), (0, 6), (1, 1)-Match Found, (0, 4), (1, 5), (0, 22)
 מבנה: (2, 7), (1, 21)
5. תמונה: (0, 10), (1, 1), (0, 6), (1, 1), (0, 3)-Match Found, (0, 1), (1, 5), (0, 22)
 בשלב זה אנו רוצים להשוות פיקסל אחד בתמונה עם ערך 0 לדרישה מהמבנה לערך 2 (שחור) ולכן אין התאמה. ניתן להפסיק את העיבוד בשלב זה ולדווח כי תוצאת פעולת הכרסום עבוד מקטע זה הינה 0 (חוסר התאמה)

6. מימוש האלגוריתמים

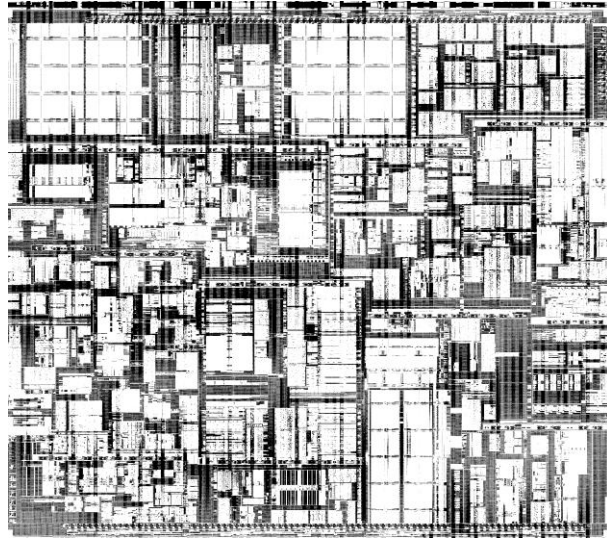
1.6. בינריזציה

האלגוריתם שתואר בסעיפים הנ"ל מתבצע על גבי תמונות בינריות אשר דחוסות בשיטת RLE. בתמונה בינרית לכל פיקסל יש ערך אחד מתוך שני ערכים אפשריים. הפיקסל יכול להיות או שחור (בחרתי בערך 1) או לבן (בחרתי בערך 0). הסיבה שבחרתי בפיקסלים שחורים להיות בעלי ערך 1 היא שלרוב כאשר מתקבל איור של מעגל מודפס אזי קווי ההולכה, שאליהם אנו נרצה להתייחס במיוחד, הינם שחורים ולכן יותר נוח לעבוד על תמונות בפורמט כזה ולהציגן כך בהמשך. תהליך הבינריזציה שביצעתי הינו בינריזציה על פי סף. בהינתן תמונה עם גווני אפור, כלומר ערכים מ-0 ועד 255 אזי הסף להחליט האם הפיקסל הוא לבן או שחור הוא 128. התוכנה יודעת להתמודד עם תמונות צבעוניות אך יתכן כי אלגוריתם בינריזציה שכזה לא ייתן תוצאות מיטביות. תהליך הבינריזציה מבוצע בתור השלב הראשון באלגוריתם, לפני דחיסת התמונה בשיטת RLE, שכן דחיסת ה-RLE שאיתה עבדתי התבססה שהקלט אליה הינה תמונה בינרית. סיבוכיות תהליך הבינריזציה הינו $O(n)$, כאשר n הינו מספר הפיקסלים בתמונה. אומנם אין זה תהליך יקר אך לא התחשבתי בו במהלך בדיקות הביצועים שכן הציפייה היא שבשימושים פרקטיים של אלגוריתם זה לא יתבצע מהלך של העברת התמונה מפורמט כזה לאחר אלא שנוכל לבחור פורמט אחד ולעבוד עליו לאורך כל האלגוריתם. כלומר הציפייה היא שהתמונה תהיה דחוסה RLE משלב רכישתה וכי כל אלגוריתם יוכל לרוץ עליה. במובן זה בדיקת ההיתכנות והביצועים של הפעולות המורפולוגיות על גבי תמונה דחוסה RLE שביצעתי בעבודה זו הינה סמן להיתכנות הרצת אלגוריתם כלשהו על תמונה דחוסה RLE.

דוגמה לתהליך בינריזציה היא כדלהלן. התמונה הבאה:



איור 18 : תמונת גווני אפור, [16]



איור 19: תמונת שחור לבן כתוצר בינריוזציה, [16]

למרות שנראה כי תמונה זו מכילה גווני אפור הדבר אינו כך, שכן התמונה ברזולוציה מאוד גבוהה וזוהי רק אשליה, אם מבצעים הסתכלות לפיקסלים הבודדים נראה כי היא מכילה אך ורק פיקסלים לבנים או שחורים.

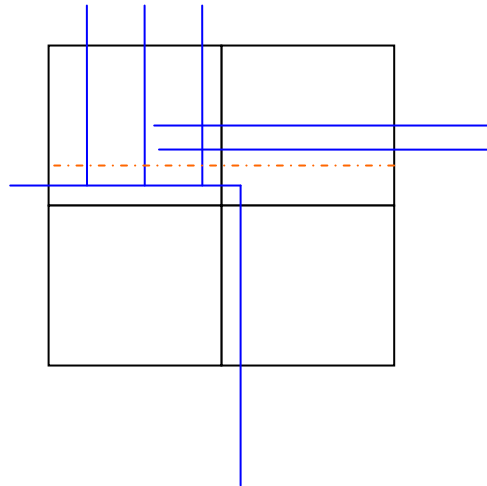
2.6. מבנה הנתונים של תמונה דחוסה בשיטת RLE

על מנת לייצג תמונה דחוסה RLE לכאורה מבנה הנתונים הוא מאוד פשוט. אנו צריכים להחזיק רשימה של רצפי ה-RLE, כאשר כל מקטע מחזיק את הערך הנוכחי של המקטע (אחד או אפס) ומספר המופעים של ערך זה. אך מבנה נתונים זה אינו יעיל לשימוש באלגוריתם שתואר בעבודה זו שכן אנו צריכים באופן תכוף לגשת למקטעים מסוימים בתמונה ואיננו מעבדים את התמונה ברצף. כדוגמה ניקח את שלב השוואת הצורות הבסיסיות. בשלב זה עלינו לקחת תמונה של צורה בסיסית ולהשוות אותה לחלון מסוים בתמונה, כאשר החלון מתאפיין בממדים פחות או יותר זהים הן בציר האנכי והן בציר האופקי. אם ברצוננו לקבל את רצף הבתים המרכיבים את החלון אזי איננו יכולים להשיג זאת בקלות ממבנה הנתונים הקלאסי שבו מוחזקת תמונה דחוסה RLE. הסיבה לכך היא שבמבנה הקלאסי מוחזקת שרשרת של השורה או העמודה הראשונה בתמונה וכן הלאה וכן הלאה. אם אנחנו רוצים לקבל חלון בגודל 16X16 בפניה השמאלית עליונה של התמונה אזי עלינו לעבור על כל 16 השורות או לחלופין העמודות הראשונות עד שנקבל מידע זה. ביצוע מעברים שכאלה עבור כל עיבוד של חלון באלגוריתם היה הופך את האלגוריתם לבלתי יעיל לחלוטין ולא פרקטי. הרעיון הבא שעולה על מנת להתמודד עם בעיה זו היה להחזיק את התמונה במקטעי החלונות, אך רעיון זה אינו פרקטי שכן החלונות משתנים ומותאמים לתמונה בשלב הראשון באלגוריתם ואינם סטטיים ולכן רעיון זה אינו יישומי. בשל כל מה שצוין לעיל בחרתי לשמור את מקטעי ה-RLE בעץ. שיטה זו מאפשרת גישה מהירה למקטע מסוים.

מפתח הגישה לעץ הוא מיקום תחילת המקטע בפיקסלים יחסית לתחילת התמונה, כך שאם יש צורך בגישה למקטע הכולל את פיקסל $[x,y]$ אזי באפשרותי לחפש את המקטע עם האינדקס הכי קרוב למיקום הפיקסל: $PixelLocation = y \cdot imageWidth + x$.

3.6. חלוקת התמונה לחלונות והתאמתם לתמונה

בשלב זה חילקתי את התמונה לחלונות בסיסיים בגודל 32×32 פיקסלים. כמוכן שייתכנו תמונות אשר אינן כפולות של 32 פיקסלים ובמקרים שהשארית היא קטנה (לדוגמה 5 פיקסלים) הרי אין אפשרות לבצע את האלגוריתם על חלון כזה קטן ולכן בחרתי לחלק את השארית על פני מספר חלונות וליצור מספר חלונות אשר גדולים בפיקסל מהגודל המקורי של 32×32 ל- 33×33 . נקודה חשובה אשר נתקלתי בה במהלך המימוש היא היחס בין החלונות. כפי שמתואר באלגוריתם אנו מחפשים חלונות תקינים ומנסים לשנות את גבולות החלון במידה מסוימת על מנת שהחלון יהיה תקין. בהנחה ושינינו את גבולות חלון מסוים על מנת שהוא יהיה תקין, איך הדבר משפיע על החלונות השכנים? האם הם מתחילים מנקודת הגבול החדשה? התשובה היא שלא, שכן אחרת תיווצר רשת חלונות סבוכה מאוד לטיפול או אפילו בלתי אפשרית.



איור 20 : התאמת חלונות

ניתן לראות בדוגמה אשר באיור הנ"ל את חלוקת החלונות הבסיסיים ואת קווי ההולכה. הריבועים השחורים מייצגים את חלוקת החלונות הראשונית והקווים הכחולים את קווי ההולכה. נתייחס כעת לחלון הימני העליון. חלון זה ירצה להזיז את הגבול התחתון שלו כלפי מעלה על מנת לא לחתוך את קו ההולכה השלישי (חיתוך עם הפאה השמאלית) אשר יהפוך את החלון ללא תקין. אך הזזה זו אינו קבילה ותפגע בחלון השמאלי העליון אם הוא היה מתחשב בהזזה זו. זוהי רק דוגמה קטנה, ישנם המון מקרים והרבה יותר מסובכים אשר הקשר בין החלונות גובל בבלתי אפשרי ולכן הדרך הנכונה למימוש האלגוריתם היא שכל חלון הינו עצמאי ומזיז את גבולותיו על מנת להיות תקין על פי כללי האלגוריתם, אך החלונות שהם שכנים לו אינם כפופים להזזות אלו וקובעים את גבולותיהם באופן עצמאי. משמעות הדבר כי ייתכנו חפיפות או חורים קטנים בין החלונות אך דבר זה לא יפגע באופן מהותי באלגוריתם שכן אלו אינם אזורים שנחשבים תקינים מבחינת האלגוריתם והם שקולי ערך לחלונות לא תקינים אשר אינם מעובדים באלגוריתם זה.

4.6. תמונות מבני היסוד

תמונות מבני היסוד הינן תמונות של רכיבים יסודיים שמהם מורכבת תמונת המעגל המודפס. דוגמאות לתמונות שכאלה הינם קו אופקי, קו אנכי, הצטלבות קוים, נקודת מגע וכיוצא בזה. הרכיבים היסודיים תלויות בטכנולוגיה של ייצור המעגל המודפס, אופיו ופה לפי דעתי טמון חסרון שכן אלגוריתם חזק מתאפיין בכך שהוא יכול להתמודד עם קלט כלשהו ועדיין להוציא תוצאה מעניינת ומאתגרת מבחינת המשתמש ובמינימום קלט מהמשתמש. הצורך לייצור ספרייה של תמונות מבני היסוד עבור סוגי מעגלים מודפסים שונים הוא אינו נוח ומהווה חסרון. להלן דוגמאות מספריית מבני היסוד אשר יצרתם לצורך הרצת האלגוריתם:



- גם שטח ריק הינו מבנה יסוד שכן יש שטחים במעגל המודפס שאין עליהם אף רכיב.



איור 21: מבני יסוד

כפי שניתן לראות השתמשתי במבנים זהים אך בגדלים שונים. באופן תיאורטי אין לעשות כך וכפי שצוין בסעיפים קודמים חלק מתהליך השוואת החלונות הינו מציאת יישור גודל (Scaling). על מנת לפשט את מימוש האלגוריתם ומכיוון שמימוש יישור גודל אינו הפוקוס המרכזי של עבודה זו החלטתי לפשט את המימוש בקטע זה ולהתייחס לנושא יישור הגודל על ידי בדיקת מבנים זהים בגדלים שונים.

5.6. מציאת הפגמים

בסיסו של האלגוריתם לאחר שביצענו את השלבים הקודמים הוא השוואה בין חלון תקין למבני היסוד ובדיקה האם יש התאמה. זהו משפט מאוד יפה אך שבאים לפרוט אותו לפרטים איך בודקים האם יש התאמה? אתחיל מתיאור מהי השוואה בין מבנה בסיס לבין חלון. השוואה בין מבנה בסיס לבין חלון הינה ביצוע פעולת XOR בין מבנה היסוד לבין החלון. הגודל הראשוני של כל חלון וחלון תואם לגודל מבני היסוד (במקרה שלי היה זה 32X32 פיקסלים) אך כידוע החלונות יכולים לגדול כתוצאה משארית הפיקסלים בתמונה כפי שתואר בסעיפים הקודמים וגם התאמת החלונות משנה את החלונות כך שבסופו של דבר חלון תקין אינו בהכרח בגודל 32X32. אי לכך איך מתבצעת השוואת XOR בין שתי מטריצות אשר אינן באותו גודל? הפתרון שאני מצאתי לבעיה זו הינו לקחת את מרכזי התמונה עבור כל אחד מהישויות המשוות ולהשוות תמונה אשר היא המינימום בגודל מבין החלון המותאם התקין ובין מבנה היסוד. טכניקה אחרת שהייתה יכולה להיבחר היא ביצוע Scaling בין התמונות אך פעולה זו יקרה חישובית יחסית לפתרון הנבחר והעדפתי, על מנת לפשט את הפתרון, לא לבחור בה. לאחר שביצענו פעולת XOR בין מבנה היסוד לבין החלון אזי קיבלנו פגמים פוטנציאליים. אך ישנם מספר מבני בסיס אליהם ביצענו פעולת השוואה. חלקם הניבו 3 פגמים פוטנציאליים, חלקם 10 פגמים פוטנציאליים וחלקם יותר. איך מתבצעת ההחלטה האם ישנו מבנה בסיס אשר תואם לחלון הנוכחי? ההחלטה מתבצעת על בסיס ההשוואה אשר הניבה מינימום פגמים פוטנציאליים. ההנחה מאחורי החלטה שכזו היא שאם ישנה התאמה למבנה היסוד אזי לא יתקבלו פגמים פוטנציאליים או לחלופין מעט מאוד פגמים שנובעים מיישור תמונה לא מושלם ואי דיוקים כאלה או אחרים. אי לכך האלגוריתם שמימשי עבור כל חלון מבצע השוואה מול כל מבני היסוד. אם התגלה מבנה בסיס אשר לא הניב פגמים פוטנציאליים בהשוואה אזי הוא נבחר ותהליך ההשוואות עבור חלון זה מופסק על מנת לחסוך בזמן חישוב, אך אם כל מבני היסוד הניבו פגמים פוטנציאליים בהשוואה אזי המבנה הנבחר הוא זה שהניב מינימום פגמים פוטנציאליים. הפגמים נשמרים ברשימה כאשר כל פגם שכזה מכיל התייחסות למבנה שבאמצעותו הוא התגלה. הסיבה לכך תוסבר בהמשך.

ביצוע פעולת ה- XOR דרש תשומת לב להמון פרטים שכן האלגוריתם כפי שהוא תואר התייחס באופן תיאורטי לרצף של בתים המאוחסנים בקידוד RLE. כפי שכבר צוין ההשוואה מתבצעת על חלונות בתמונה הדחוסה, אי לכך לא יכולתי לעבוד על רצף בתים שבתמונה הדחוסה וכי היחידה שהיה נוח לעבוד איתה הייתה השורה. הסיבה ששורה הייתה צורה נוחה ומהירה באופן יחסי לבצע את ההשוואה היא שעבור כל שורה יש לנו רצף בתים בתמונה, גם כאשר היא שמורה בדחיסת RLE. כאשר סיימנו לעבד שורה שלמה אזי אנו עוברים שורה על ידי גזירת מקטע נוסף מתוך התמונה הגדולה. הדרך למימוש הייתה לעבור על כל שורה בחלון, עבור כל שורה זיהיתי את מיקום תחילת השורה ושלפתי מתוך התמונה הדחוסה (בזכות זה שמבנה הנתונים היה עץ) את הרצף הראשון שמכיל את תחילת השורה. מנקודה זו האלגוריתם הופעל כפי שתואר בהשוואה מול תמונת מבנה היסוד שהייתה דחוסת RLE גם כן. כך תהליך זה חזר על כל שורה בחלון עד לקבלת רשימת הפגמים המלאה עבור חלון זה ומבנה בסיס מסוים.

נחזור כעת שלב אחד אחורה וניזכר שלכל פגם שמרתי התייחסות למבנה היסוד שבאמצעותו הוא נמצא. הסיבה לכך היא שבשלב סינון הפגמים אנו רוצים לבצע כרסום על מנת להוריד את הפגמים הלא המעניינים, אך מהו פגם לא מעניין? פגם לא מעניין הוא פגם אשר בהקשר בו הוא נמצא הוא לא יגרום נזק פונקציונאלי למעגל. ניתן לבצע כרסום אחיד על כל המעגל המודפס עם מבנה מסוים אך פעולה זו תניב תוצאות פחות טובות מאשר פעולת כרסום מכוונת. שמירת ההתייחסות למבנה היסוד אשר מצא את הפגם מאפשרת בשלב הכרסום לבחור מבנה כרסום אחד או יותר להפעלה על הפגם, כאשר מבני כרסום אלו מיועדים לגלות פגמים אשר הם משמעותיים, כלומר פגמים פונקציונאליים, במבנה היסוד הרלוונטי.

7. בדיקת הביצועים

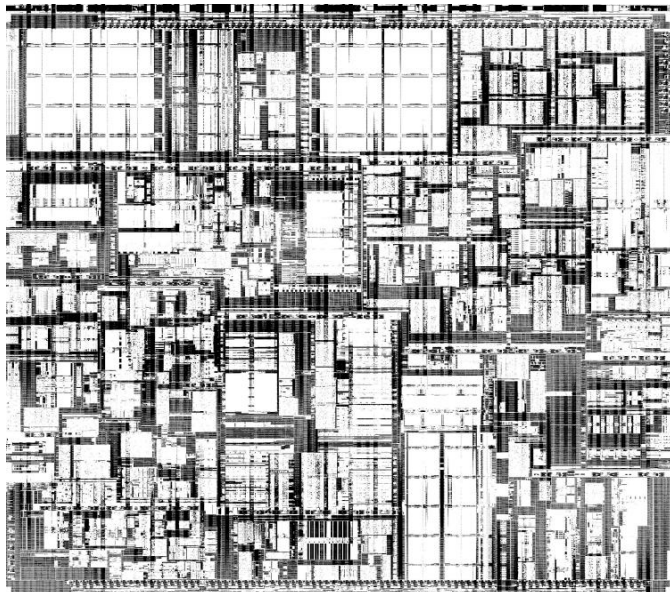
1.7. מציאת תמונת הבדלים – הדרך הפשוטה

בעבודה זו תיארתי אלגוריתם למציאת פגמים על ידי חלוקת התמונה לחלונות והשוואתם למבני יסוד אשר אמורים להופיע במעגל המודפס. בשיטה זו עלינו למצוא את תמונת ההבדלים בין מבני היסוד לבין חלון העבודה הנוכחי בתמונה הנבדקת. זוהי רק שיטה אחת מני עשרות שיטות אשר מפתחות את אותו הרעיון בווריאציות שונות. בנוסף לכך ישנן שיטות אחרות, כפי שתואר בתחילת העבודה, אשר מחשבות את תמונת ההבדלים על גבי התמונה בכללותה ומבצעות איזושהו עיבוד על נתונים אלו. הבסיס למקבץ שיטות זה הוא מציאת תמונת ההבדלים הבסיסית והפשוטה בין שתי תמונות, זו של המעגל המודפס הנוכחי ותמונת היחס (ללא קשר לדרך יצירת תמונת היחס). הדרך הפשוטה ביותר למציאת תמונת ההבדלים היא ביצוע פעולת XOR בין תמונת היחס של המעגל המודפס (בין אם זו תמונה שנגזרה מקובץ התכנון ובין אם זו תמונה של "מעגל הזהב") ובין תמונת המעגל הנוכחי. בסעיף זה מימשתי את חישוב תמונת ההבדלים הפשוטה בשתי שיטות שונות. השיטה הראשונה, הינה השיטה הסטנדרטית והטריוויאלית של מעבר פיקסל, פיקסל והשוואת כל פיקסל בין שתי התמונות. השיטה השנייה היא ביצוע XOR בין תמונות דחוסות RLE כפי שתואר בסעיפים הקודמים. בדיקה זו היא חשובה שכן מציאת ההבדלים על ידי פעולת XOR היא לא רק בסיס לשיטות השוואה שונות אלא שהיא גם מהווה חלק חשוב מהשיטות האחרות, כגון האלגוריתם שתיארתי בעבודה זו.

מטרת סעיף זה:

1. להראות יישומיות של שיטה זו.
2. בדיקת ביצועי שיטה זו לעומת שיטה הסטנדרטית.

הבדיקה נעשתה על גבי מחשב עם 2GB זכרון RAM, מעבד AMD Athlon 2.2GHz ובשפת Java באמצעות Java Virtual Machine V6. להלן התמונה שאותה ניתחתי:

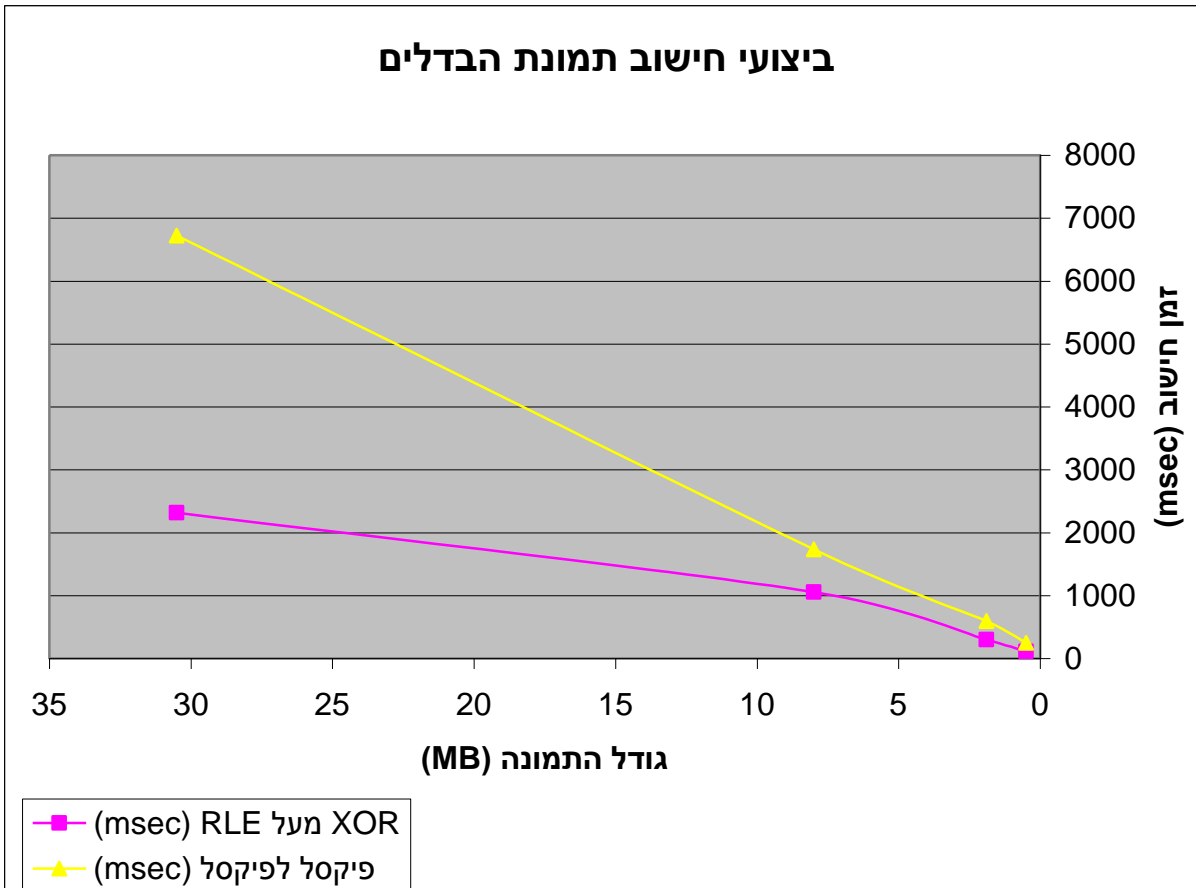


איור 22: תמונה לעיבוד

להלן התוצאות:

| גודל התמונה (MB) | XOR מעל RLE (msec) | פיקסל לפיקסל (msec) |
|------------------|--------------------|---------------------|
| 0.5 | 110 | 250 |
| 1.9 | 297 | 593 |
| 8 | 1052 | 1734 |
| 30.5 | 2317 | 6723 |

ובצורה גראפית:



ניתן לראות בבירור כי כאשר תמונת ההבדלים חושבה על ידי מעבר על כל פיקסל אזי זמן החישוב הינו ליניארי למספר הפיקסלים בתמונה וכי הוא עולה ביחס ישר לגודל התמונה. לעומת זאת ניתן לראות כי חישוב תמונת ההבדלים על ידי ניתוח התמונה הדחוסה אכן איננו תלוי ליניארית במספר הפיקסלים וכי הביצועים בו כמעט ואינם מושפעים מגודל התמונה.

2.7. ביצוע הכרסום כחלק מסינון הפגמים

השלב השני של בדיקת הביצועים בעבודה זו הינו לבדוק עד כמה יעיל לבצע שלב כמו סינון פגמים על גבי תמונה דחוסה RLE לעומת השיטה הסטנדרטית של העברת גרעין (מבנה) על התמונה ועבור כל פיקסל. השוואה זו היא רק מדד לעד כמה מוצלחת האפשרות לשלב עיבוד תמונה מעל תמונה דחוסה RLE במהלך כל אלגוריתם למציאת פגמים שכן כל אלגוריתם בנושא זה משתמש בפעולות מורפולוגיות, והרי כרסום והרחבה הינן שתי הפעולות המורפולוגיות הבסיסיות וכל שאר הפעולות המורפולוגיות מתבססות עליהן. הצלחה של ביצוע כרסום מעל תמונה דחוסה RLE, משמעותה כי ניתן לשלב עבודה עם פעולות מורפולוגיות מעל תמונות דחוסות RLE ולקבל יתרון לא רק בחיסכון בזיכרון, אלא גם בביצועי חישוב.

מטרת סעיף זה:

3. להראות יישומיות של שיטה זו.

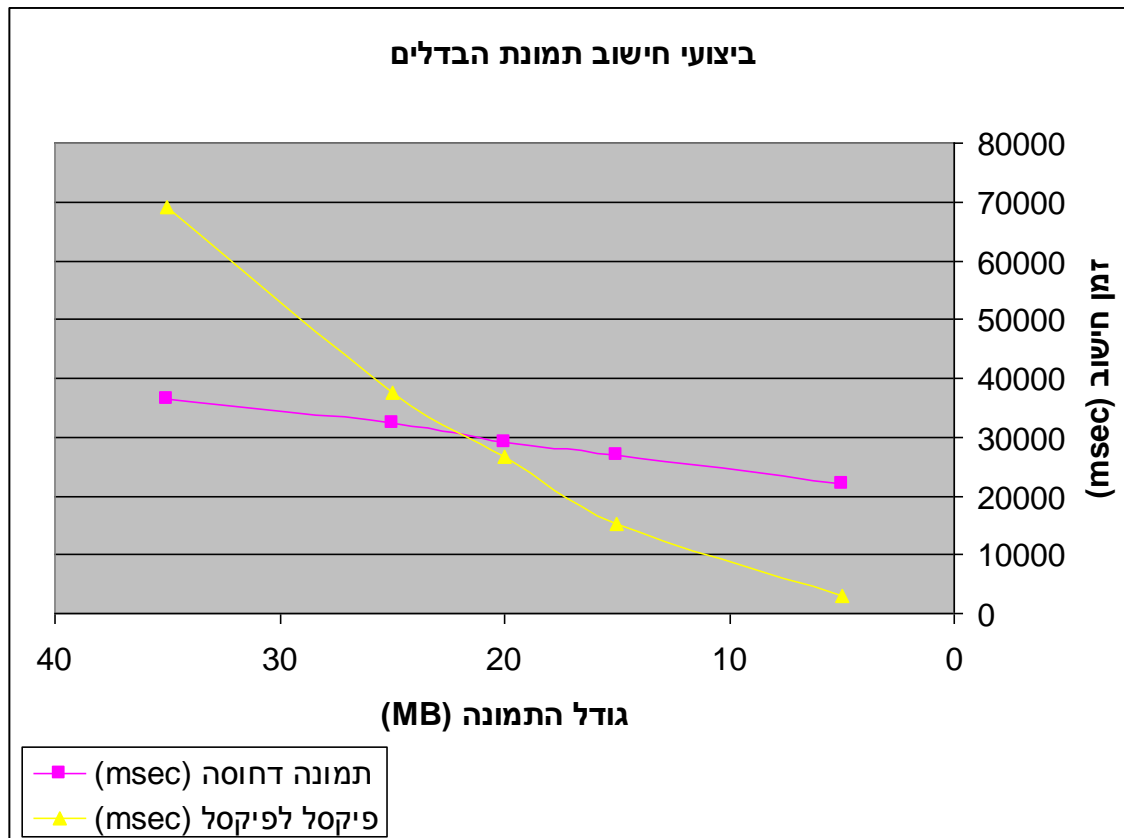
4. בדיקת ביצועי שיטה זו לעומת שיטה הסטנדרטית.

הבדיקה נעשתה על גבי מחשב עם 2GB זכרון RAM, מעבד AMD Athlon 2.2GHz ובשפת Java באמצעות Java Virtual Machine V6.

הניתוח התבצע על תמונה המופיעה באיור 22. התבצעו שתי בדיקות בסעיף זה. הבדיקה הראשונה בדקה את ביצועי האלגוריתם עם השתנות גודל המבנה לכרסום.

להלן התוצאות:

| גודל המבנה | תמונה דחוסה (msec) | פיקסל לפיקסל (msec) |
|------------|--------------------|---------------------|
| 5 | 21994 | 2973 |
| 15 | 27052 | 15109 |
| 20 | 29094 | 26609 |
| 25 | 32505 | 37666 |
| 35 | 36452 | 69057 |



ניתן לראות מהנתונים הנ"ל כי ביצוע כרסום מעל תמונה דחוסה פחות יעיל ולוקח יותר זמן במבנים קטנים ובינוניים. נקודת המעבר היא עבור מבני כרסום בגודל 20 פיקסלים לערך. עבור מבני כרסום בגודל 20 פיקסלים ומטה אין זה כדאי לבצע את הכרסום מעל תמונה דחוסה RLE. לעומת זאת במבנים גדולים, מעל 20 פיקסלים, ניתן לראות כי ההבדל בביצועים הוא באופן משמעותי יותר טוב כאשר פועלים מעל תמונה דחוסה RLE וההבדלים נהיים יותר ויותר מהותיים ככל שגודל המבנה גדל.

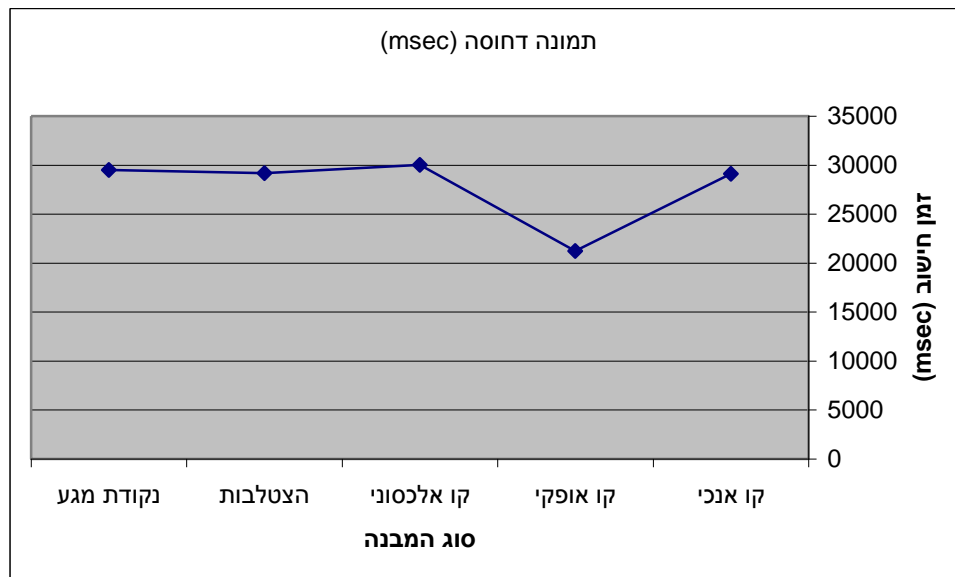
נשאלת השאלה מדוע לא קיבלנו ביצועים יותר טובים מעל תמונה דחוסה RLE עבור כל גדלי המבנים, לאורך כל הדרך? התשובה היא כי אלגוריתם כלשהו לעבודה מעל תמונה דחוסה RLE הוא אידיאלי כאשר עובדים על התמונה כולה. מבנה הנתונים של תמונה דחוסה RLE אינו מתייחס למקטע מסוים בתמונה והוא שומר רצף של בתים המתאר את כל התמונה ללא התייחסות למקטעים מסוימים כפי שצוין. במקרה של אלגוריתם הכרסום המתואר כאן, בכל רגע נתון אנו "גוזרים" מקטע מהתמונה ומבצעים איזושהי פעולה בין המקטע לבין מבנה הכרסום. תהליך "הגזירה" אינו טבעי למבנה הנתונים בו שמורה תמונה דחוסה RLE ולכן ישנה איזושהי תוספת קבועה של זמן כאשר מבצעים "גזירות" שכאלה מעל מבנה נתונים של תמונה דחוסה RLE. ככל שגודל מבנה הכרסום עולה, מספר המקטעים אותם אנו "גוזרים" קטן והתהליך מתחיל להיות דומה לעבודה על התמונה כולה, בה נקבל ביצועים אידיאליים. ניתן לראות התנהגות זו בבירור בגרף הנ"ל כאשר נקודת ההתחלה במבני כרסום הינה גבוהה מאוד (מבחינת זמן חישוב) לעומת השיטה השנייה. ככל שגודל מבנה הכרסום עולה, זמן החישוב כמעט ואינו משתנה וזה בשל התוספת הקבועה והמשמעותית שתהליך ה"גזירה" גוזל.

הבדיקה השנייה אשר התבצעה היא בדיקת ביצועי האלגוריתם כפונקציה של מבנה הכרסום בו אנו משתמשים. הבדיקה התבצעה בגדלי מבנה של 20 פיקסלים.

להלן התוצאות:

| סוג המבנה | תמונה דחוסה (msec) |
|------------|--------------------|
| קו אנכי | 29094 |
| קו אופקי | 21219 |
| קו אלכסוני | 30016 |
| הצטלבות | 29171 |
| נקודת מגע | 29500 |

ובצורה גראפית:



ניתן לראות כי שיטת החישוב אינה מושפעת מהותית מסוג המבנה. בארבעה מתוך חמשת המבנים שנוסו לא היה שינוי כלל בזמן החישוב. בסוג מבנה של קו אופקי הודגם שינוי בזמן החישוב. שינוי זה ניתן להסביר על ידי אופי התמונה. אלגוריתם הכרסום מחשב את ערכו של כל פיקסל ופיקסל בהתאמה למבנה. אם בתחילת ההשוואה של סביבתו של הפיקסל למבנה הכרסום מתגלה אי התאמה אזי ההשוואה מופסקת ועוברים לפיקסל הבא. אי לכך יתכן כי שינוי מבנה יגרום לשינוי מה בזמן החישוב שכן הוא יגרום ליותר השוואות להמשיך או לחילופין להפסיק בשלב יותר מוקדם. מכיוון שבשאר סוגי המבנים הודגמה התאמה מלאה בזמן החישוב, ומכיוון כי השינוי בזמן החישוב אינו מהותי ניתן לסכם כי סוג המבנה אינו משפיע על זמן החישוב.

8. סיכום

בעבודה זו הדגמתי מימוש של אלגוריתם למציאת פגמים במעגלים מודפסים מעל תמונה דחוסה RLE וחקרתי את ביצועי הפעולות המורפולוגיות שהן הבסיס לכל אלגוריתם למציאת פגמים, על גבי תמונה דחוסה RLE. כאשר קוראים מאמר כזה או אחר על תיאוריה מסוימת הדבר הינו מעניין מאוד, אך לא פחות מעניין הוא לבוא ולנסות לתרגם זאת לפסים מעשיים. בשלב הראשון שקראתי את המאמרים ואת התיאוריה נראה כי כל הפרטים משתלבים יפה אחד בשני וכי לא צפויות לי בעיות במימוש. אך, כצפוי אפשר לומר, נתקלתי בלא מעט פינות ותהיות שתיארתי אותם במהלך העבודה עד ההגעה לקו הגמר.

כאשר אני מסתכל כעת על העבודה בפרספקטיבה אחורה הסקתי מספר מסקנות כדלהלן:

1. האלגוריתם אשר מבוסס על השוואה לצורות בסיס אינו פרקטי בצורתו הנוכחית ממספר סיבות. איתור ובניית מאגר מבני היסוד עבור כל סוג של מעגל מודפס הוא אינו שלב פרקטי שכל מפעל ייצור יסכים אליו, שכן הוא מעריך את זמן המחזור מרגע קבלת המעגל המודפס ועד הזמן לקבלת תוצאות ראשוניות. דבר זה יבוא לידי ביטוי בעיקר ביצרנים במזרח אסיה אשר מפעילים מפעלים לייצור המוני לפי הזמנה. כלומר אין בידם טכנולוגיה מסוימת אלא הם מקבלים תכנון של מעגל מלקוחות מסוימים ומייצרים עבורם מספר פריטים מסוים ועוברים להזמנה הבאה. אופי עבודה שכזה דורש זמן מחזור קצר מרגע קבלת התכנון של המעגל ועד לקבלת תוצאות ובדרך כלל עם מינימום התערבות. לרוב המפעילים של מוצרים שכאלו הינם אנשים פשוטים עם רמת השכלה מינימאלית אשר אין בידם את הידע לאתר ולבנות מאגר תמונות בסיס. בנוסף לסיבה זו ההשוואה למבני היסוד עצמם היא בעייתית. מכונות מעצם טבעם אינן מדויקות ב-100% ותמונת המעגל המודפס אף פעם לא תדמה למבנה היסוד התיאורטי. אי לכך כאשר משווים בין תמונת הבסיס לבין חלון מסוים יש צורך לבצע Scaling & Registration בין התמונות, פעולה אשר היא יקרה חישובית ותהפוך את השיטה ללא יעילה. אני התגברתי על כך במהלך העבודה על ידי ייצור תמונות בסיס בווריאציות שונות אך הפתרון האמיתי כפי שצינתי הוא לבצע רישום בין מבנה היסוד ובין חלון העבודה. מהיכרותי עם שיטות אחרות יש צורך ב-Registration אך לא ב-Scaling, וכמו כן מספר הפעמים לאורך אלגוריתמים אחרים בהם יש לבצע Registration נמוך משמעותית ממספר הפעמים שיש לבצע Registration באלגוריתם זה (מספר החלונות התקינים).

2. ביצוע אלגוריתם מעל תמונה דחוסה RLE הינו בהחלט דבר מעניין שיכול לתרום ולקדם כל מי שיבחר להשתמש בו. סה"כ ביצועי האלגוריתם מבחינת זמן היו קצרים ובהתחשב בכך שאנו זוכים גם בחיסכון זיכרון מהותי אזי השילוב הזה הוא בהחלט שילוב מנצח. אני חושב שניתן להפיק הרבה יותר תועלת בעבודה על תמונה דחוסה RLE באלגוריתם אשר יעבוד פחות במקטעים, או לחלופין יעבוד על מקטעים גדולים שכן שם מקבלים יתרון משמעותי גם בביצועי הזמן העבודה מול התמונה. ישנה נקודה אשר לא נבדקה בעבודה זו וכי יהיה מעניין לחקור אותה: כיום רוב המכונות אשר עובדות לגילוי פגמים עובדות עם תמונות גווני אפור. איני יודע לכמת את ההשפעה של איבוד המידע במעבר לתמונת שחור לבן על מציאת הפגמים. לחילופין ניתן לחקור עבודה מול תמונה שאינה דחוסה RLE, אלא דחיסה אחרת שמתאימה לתמונת גווני אפור.

3. התרשמתי מהאלגוריתם לביצוע פעולות מורפולוגיות מעל תמונה דחוסה RLE, הן מבחינת פשטות האלגוריתם, הן מבחינת האופן שקל לתרגמו לפסים מעשיים והכי חשוב מבחינת ביצועי בזמן חישוב. בסעיף בדיקת הביצועים אני הראיתי שבהחלט שווה לשקול לבצע עבודת תמונה ישירות מעל תמונה דחוסה RLE שכן גם מקבלים יתרון בחתימת הזיכרון וגם בתמונות גדולות ובמבנים גדולים מקבלים יתרון משמעותי בזמן העיבוד. מכיוון שככל שהטכנולוגיה משתפרת רזולוציות התמונות הנרכשות בתעשיית המעגלים המודפסים (וגם בתעשיות אחרות) גדלה אני חושב שלעיבוד תמונות דחוסות יכול להיות יתרון בתעשייה.

4. אני עובד בתעשיית המוליכים למחצה ומתעסק עם מכונות אשר מוצאות פגמים במעגלים משולבים (מעגלים ברזולוציות יותר גבוהות ממעגלים מודפסים באופן המופשט ביותר). האלגוריתמים ואופן הפעולה בתעשייה זו מאוד דומה לכל מה שתואר כאן על מעגלים מודפסים. אני חושב שבקלות אפשר יהיה לשלב את שיטות העבודה מול תמונות דחוסות RLE גם בתעשייה זו.

לסיכום, נהניתי מאוד להעמיק בנושא, להתנסות בו וללמוד ממנו. אני רוצה להודות לד"ר ג'ק וינשטין על התמיכה וההנחיה.

9. ביבליוגרפיה

- [1] Jon R. Mandeville, "Novel method for analysis of printed circuit images", IBM Journal of Research and Development 29, no. 1 (1985): 73-87
- [2] Madhav Moganti & Fikret Ercal, "Automatic PCB Inspection Algorithms: A Survey", Computer Vision and Image Understanding 63, no. 2 (1996): 287
- [3] Ilya Bogin, Eugenily Chepin and Alexander Firsov, "Detection and localization of differences on the images of printed circuit boards", Moscow Engineering Physics Institute, "FGUP Konzern Systemprom"
- [4] Madhav Moganti & Fikret Ercal, "A Subpattern Level Inspection system for Printed Circuit Boards" Computer Vision and Image Understanding 70, no. 1 (1998): 51
- [5] Timot Hidvegi and Peter Szlogay, "Some New Analogic CNN Algorithms for PCB Quality Control" International Journal of Circuit Theory and Applications 30, no. 2-3 (2002): 231
- [6] Madhav Moganti & Fikret Ercal, "Segmentation of printed circuit board images into basic patterns", Computer Vision and Image Understanding 70, no. 1 (1998): 74-86
- [7] AirBorn Electronics Online, 17 August 2006, <http://www.airborn.com.au/method/>
- [8] Wolfram MathWorld, 1 January 2007, <http://mathworld.wolfram.com/>
- [9] Mathworks, <http://www.mathworks.com>
- [10] C. Jeremy Pye & J. A. Bangham, "A fast algorithm for morphological erosion and dilation", The European Association for Signal and Image Processing, <http://www.eurasip.org/content/Eusipco/1996/paper/pi_12.pdf>
- [11] F. Ercal, F. Bunyak, F. Hao and L. Zheng, "A fast modular RLE-based inspection scheme for PCBs", The International Society for Optical Engineering 3203, no. 1 (1997): 23
- [12] Fikret Ercal, Filiz Bunyak, Hao Feng, "Context Sensitive Filtering in RLE for PCB Inspection", The International Society for Optical Engineering 3517, no. 1 (1998): 286
- [13] Frederick M. Waltz, "Separated-kernel image processing using finite-state machines", SPIE Conf. on Machine Vision Application, Architectures, and System Integration III, Proc SPIE Vol. 2347, p. 386-395 (1994).
- [14] McGill University, Pattern Recognition Course, <http://cgm.cs.mcgill.ca/>
- [15] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Printed_circuit_board
- [16] Applied Materials, PDC, Inspection Tool Documentation