

# פרויקט סיום בקורס עיבוד תמונה: סגמנטציה מורפולוגית לדנדריטים SEM

## 1. רקע מדעי:

דנדריטים (Dendrites) בסוללות ליתיום מהווים אחד החסמים הטכנולוגיים המשמעותיים ביותר בפיתוח הדור הבא של סוללות עתירות אנרגיה. אלו הם מבנים מתכתיים מיקרוסקופיים, בעלי גאומטריה פרקטלית המזכירה ענפים, הצומחים על האנודה במהלך מחזורי הטעינה.

### עקרונות המנגנון הפיזיקלי

כדי להבין את האתגר ההנדסי בזהוי, יש להבין את אופן ההיווצרות:

1. תהליך השיקוע **Deposition** במהלך הטעינה, יוני ליתיום נודדים מהקתודה לאנודה. בתנאים אידיאליים, היונים משתבצים (Intercalation) בצורה אחידה ושכבתית.
2. היווצרות אי-סדיריות: תחת תנאי קיצון (כגון צפיפות זרם גבוהה או טמפרטורה נמוכה), נוצרת הצטברות לא אחידה של יונים על פני השטח. יוני הליתיום מצטברים נקודתית ויוצרים גביש מחטי הצומח אנכית לפני השטח.
3. כשל דיאלקטרי: הסכנה המרכזית טמונה בחדות המבנה. דנדריט שגדל יתר על המידה עלול לנקב את הממברנה המפרידה (Separator), ליצור קצר חשמלי פנימי, ולהוביל לבריחה תרמית (Thermal Runaway).

מטרת הפרויקט: פיתוח מערכת לסגמנטציה אוטומטית של דנדריטים מתמונות מיקרוסקופ אלקטרוני (SEM) לצורך חיזוי ומניעת כשלים.

## 2. הגדרת המשימה: סגמנטציה בסביבה רועשת

היעד המרכזי הוא ביצוע סגמנטציה סמנטית **Semantic Segmentation**: סיווג ברמת הפיקסל (Pixel-wise classification) להפרדת מבנה הדנדריט מהרקע.

האתגר הטכני: תמונות SEM מאופיינות ביחס אות-לרעש (SNR) נמוך. הן כוללות ארטיפקטים כגון אזורי רוויה ("שרופים"), טשטוש הנובע מטעינת המשטח (Charging Effect) ומעברים רכים (Soft Gradients). רעיון (זה רק רעיון אחד מהצעות רבות אפשריות) היא להתייחס לתמונה כאל מיפוי טופוגרפי, בו ערכי העוצמה (Intensity) מייצגים גובה, ולא להסתמך על סף (Threshold) גלובלי בלבד.

### תוצרים נדרשים:

1. מסיכה בינארית **Binary Mask** הפרדה בין הדנדריט לרקע.

2. **Pre-processing וניקוי:** הסרת אלמנטים זרים (כיתוב טכני, סקאלות) ורעשי חיישן.
3. **שלד Skeletonization** מיצוי המבנה הטופולוגי לקו בעובי פיקסל בודד (Centerline Extraction) לטובת חישובים גאומטריים.

### 3. מתודולוגיה: ניתוח השוואתי ( Deep Learning vs. Classic ) (CV

בפרויקט זה תדרשו ליישם ולהשוות שתי גישות משלימות לפתרון הבעיה:

קריטריון	גישה א': למידה עמוקה (YOLO-Seg)	גישה ב': עיבוד תמונה קלאסי
ארכיטקטורה	שימוש ב-SOTA Models כגון YOLOv8/v11.	פיתוח Pipeline דטרמיניסטי מבוסס מורפולוגיה מתמטית.
עיקרון פעולה	אימון רשת ( Transfer Learning ) וזיהוי תבניות לא-לינאריות.	בידוד אובייקטים על בסיס חוקיות גאומטרית וסטטיסטית.
תלות בנתונים	גבוהה ? מחייב דאטה-סט מתויג ומדויק (Supervised).	נמוכה ? ניתן ליישום על מדגם מצומצם ללא אימון.
רובוסטיות	עמידות גבוהה לשינויי טקסטורה מורכבים.	רגישות לשינויי תאורה; דורש כיול פרמטרים (Fine-tuning).

### 4. הכנת הנתונים

איכות המודל תלויה ישירות באיכות הנתונים והתיוג.

עבור גישה ב' אותה יש לממש, אימון מודל YOLO, אפשר להשתמש מאחד מהכלים הבאים:

- **Roboflow** מומלץ לשימוש בשל יכולות ה-Auto-labeling וייצוא טבעי לפורמט YOLO Segmentation. מתאים לפרויקטים שאינם מסווגים.
- **CVAT (Computer Vision Annotation Tool)** הסטנדרט התעשייתי לפרויקטים הדורשים פרטיות מידע (On-premise).

○ שיטת התיג: חובה להשתמש ב-Polygons בלבד.

## 5. מימוש הגישה הקלאסית

לצורך התמודדות עם תמונות רועשות ללא שימוש ברשתות נוירונים, יש לממש את שרשרת העיבוד (Pipeline) - המצלה ראשונית למימוש ויש עוד

1. **Contrast Enhancement:** שימוש ב-CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization) לשיפור הניגודיות המקומית והדגשת פרטים באזורים מוצלים.
2. **Denoising:** יישום **Bilateral Filter**. בחירה זו קריטית לשמירה על חדות השפות (Edge Preserving) תוך החלקת רעשים במשטחים אחידים.
3. **Morphological Reconstruction:** טכניקה מתקדמת המבוססת על Geodesic Dilation:
  - ביצוע (Erosion) אגרסיבית ליצירת "זרעים" (Seeds/Markers) וודאיים.
  - שיחזור המבנה באמצעות הרחבה מותנית (Conditional Dilation), כאשר המסיכה המקורית משמשת כגבול עליון. שיטה זו יעילה במיוחד לסינון רעשים שאינם מחוברים למבנה המרכזי.
4. **Separation Algorithms:** שימוש ב-Distance Transform בשילוב עם אלגוריתם Watershed להפרדת ענפים המשיקים זה לזה.

## 6. מדדי הערכה (Evaluation Metrics)

איכות הפתרון תיבחן על בסיס קריטריונים הנדסיים:

1. **דיוק IoU / Dice Score:** מדידת החפיפה בין תוצאת האלגוריתם לבין ה-Ground Truth הידני.
2. **Robustness:** בחינת יציבות האלגוריתם תחת תמונות שונות.
3. **Failure Analysis:** דיון מעמיק במקרים בהם המערכת כשלה, תוך אפיון הסיבות (כגון: רזולוציה גבולית, ארטיפקטים ייחודיים).

## 7. הוראות הגשה (Submission Guidelines)

הגשת הפרויקט תתבצע בתיקייה אחת (Zip) הכוללת את הרכיבים הבאים:

### א. דו"ח מסכם (PDF)

מבנה הדו"ח יהיה כשל מאמר טכני ויכלול:

1. **תקציר:** הגדרת הבעיה, הפתרון הנבחר והתוצאות העיקריות.
2. **מתודולוגיה:** הסבר מפורט על שני ה-Pipelines (קלאסי ו-DL), כולל בחירת הפרמטרים.
3. **תוצאות ודיון:** הצגת מדדי הדיוק (IoU/Precision/Recall), טבלאות השוואה, וניתוח ויזואלי של הצלחות וכשלונות.
4. **מסקנות:** באיזו שיטה כדאי להשתמש באיזה תרחיש.

### ב. קוד מקור (Source Code)

- קוד מסודר ומתועד (Docstrings + Comments).
- קובץ requirements.txt להתקנה.
- קובץ README.md עם הוראות הרצה ברורות (איך להריץ אימון, איך להריץ Inference).
- ניתן לממש sikit-image ו-cv2.

### ג. תיקיית תוצאות (Artifacts)

- **דוגמאות ויזואליות:** לפחות 5 תמונות המציגות: תמונת מקור -> מסיכה (קלאסי) -> מסיכה (YOLO) -> שלד (Skeleton).
- **קבצי משקולות Weights:** קובץ pt של המודל המאומן הטוב ביותר (Best Model). אפשר להגיש קישור לשיתף ב-drive.

### ד. הצגה

מצגת בת 5 דקות הכוללת הדגמה חיה עם סרטון מוקלט של ריצת האלגוריתם על סט נתונים חדש.

בהצלחה!

על מנת לקבל את הנתונים לתרגיל יש להירשם בקישור הבא

<https://forms.gle/zeTSoa78uBNgMrMM7>

נספח - הצעה מעט יותר מורחבת לעיבוד תמונה \*\* זה רק הצעה \*\* אפשר לממש כל גישה אחרת.

## שלב א': עיבוד מקדים (Pre-processing)

תמונות מיקרוסקופיה אלקטרונית (SEM) סובלות לרוב מרעש "גרעיני" (Shot Noise), חוסר אחידות בתאורה (Vignetting) וקונטרסט נמוך בקצוות הדקים של הדנדריטים. מטרת שלב זה היא לנרמל את המידע הגולמי ולמקסם את ההפרדה בין האובייקט לרקע לפני שהאלגוריתם מתחיל לקבל החלטות.

### 1. נרמול היסטוגרמה (Histogram Normalization):

לפני כל פעולה מורכבת, חובה לבצע מתיחה ליניארית של ערכי הפיקסלים לטווח המלא

- הרציונל: פעולה זו מבטיחה "בסיס משותף" לכל התמונות, כך שערכי הסף (Threshold) שייקבעו בהמשך יהיו יציבים גם אם תמונה אחת צולמה בחשיפה שונה מחברתה.

### 2. שיפור ניגודיות מקומי (CLAHE):

שימוש ב-Histogram Equalization רגיל (גלובלי) הוא טעות נפוצה בתמונות אלו, שכן הוא נוטה "לשרוף" אזורים בהירים ולהגביר רעש באזורים חשוכים. הפתרון הוא CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization):

- איך זה עובד: האלגוריתם מחלק את התמונה (Tiles) ומחשב היסטוגרמה נפרדת לכל אזור, תוך הגבלת ההגברה (Clipping) כדי למנוע מרעש רקע להפוך ל"אובייקט".
- התוצאה: שיפור דרמטי בזיהוי ענפים דקים ועדינים, גם אם הם נמצאים באזור מוצל של האלקטרודה.

## שלב ב': סגמנטציה וסינון רעשים (Segmentation & Denoising)

המרה של תמונה רציפה בגווני אפור (Grayscale) למפה בינארית (שחור/לבן), תוך מאבק מתמיד בין הסרת רעש לבין שמירה על פרטים.

### 1. סינון רעשים משמר-שפה (Edge-Preserving Filter):

פילטרים נפוצים כמו Gaussian Blur מבצעים ממוצע מרחבי ולכן מטשטשים את קצות הדנדריטים. טשטוש זה גורם לאיבוד מידע קריטי על עובי הענף האמיתי.

- הפתרון המומלץ: Bilateral Filter.
- מנגנון הפעולה: הפילטר מחליק משטחים (Denoising), אך הוא כולל רכיב נוסף המודד את הפרש עוצמת הצבע. אם הוא מזהה "קפיצה" חדה (Edge), הוא מפסיק את ההחלקה באותה נקודה. כך נשמרת החדות (Sharpness) של דפנות הדנדריט בעוד הרעש הפנימי והחיצוני מוסר.

### 2. אסטרטגיות סף (Thresholding):

בחירת השיטה תלויה באיכות התמונה:

- Adaptive Thresholding (המומלץ לרוב): השיטה המועדפת לתמונות SEM. האלגוריתם מחשב סף דינמי לכל פיקסל בנפרד בהתבסס על ממוצע השכנים שלו
- Otsu's Binarization: מתאים רק אם התאורה אחידה לחלוטין (ללא הצללות). שיטה זו

היא סטטיסטית-גלובלית ומוצאת את הסף האופטימלי הממזער את השונות בתוך שתי המחלקות (רקע ואובייקט).

## שלב ג': עיבוד מורפולוגי (Post-Processing)

לאחר הבינאריזציה, התוצאה הגולמית אינה מושלמת. היא מכילה לרוב "חורים" בתוך גוף הענפים, קיטועים בענפים דקים ו"איים" של רעש אקראי ברקע. שלב זה נועד לתקן פגמים אלו באמצעות לוגיקה גיאומטרית.

### 1. שחזור מורפולוגי (Morphological Reconstruction):

- זוהי טכניקה מתקדמת לניקוי רעש ללא פגיעה במבנה הדנדריט (בניגוד לפעולות Opening רגילות שעלולות למחוק ענפים דקים). השיטה פועלת על בסיס שתי תמונות:
- **המסכה Mask** התמונה הבינארית המקורית (המכילה את הדנדריט המלא + הרעש).
  - **הסמן Marker** תמונה שעברה (Erosion) אגרסיבי, כך שנותרו בה רק "גרעינים" הוודאיות והעבות ביותר של הענפים המרכזיים (ללא רעש רקע כלל).
  - **התהליך:** מבצעים הרחבה (Dilation) איטרטיבית של ה-Marker אל תוך ה-Mask. הגרעינים גדלים עד שהן פוגשות את גבולות הדנדריט המקורי במסכה,

### ניקוי סופי (Cleaning Artifacts):

- **Closing** פעולה מורפולוגית לסגירת חורים ליצירת רצף מלא.
- **סינון רכיבי קשירות Connected Components Analysis** כל אובייקט ששטחו קטן מסף מסוים (למשל, מתחת ל-50 פיקסלים) מסווג כרעש ומוסר, תחת ההנחה הפיזיקלית שדנדריט הוא מבנה רציף וגדול.