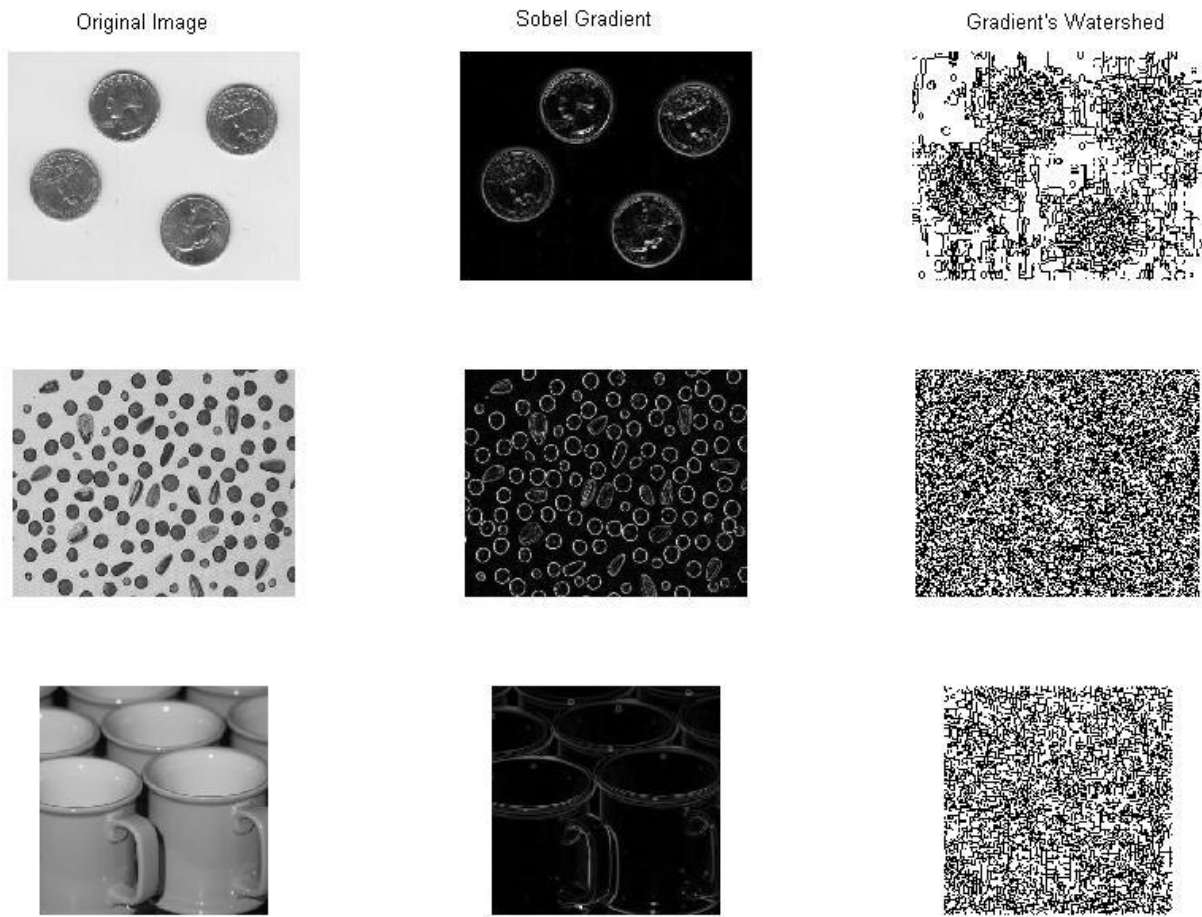


ניתוח ישיר של תמונות פשוטות

ניסיון ראשוני ונאיבי לשימוש באלגוריתם Watershed כולל שימוש בערך המוחלט של הגרדיינט ליצירת תמונה (לאורך כל העבודה נעשה שימוש בהגדרת הגרדיינט של Sobel לאחר שבחנתי מספר הגדרות שונות ללא הבדל משמעותי בתוצאות) וניתוח ישיר של התמונה באמצעות Watershed. התוצאות עבור שלוש תמונות פשוטות מובאות בתרשים שבעמוד זה. ניתן לראות כי גם עבור תמונות אלה מתקבלת תופעה חריפה של oversegmentation המקשה על זיהוי השפות האמיתיות בתמונה. הגורם העיקרי לכך הוא, כאמור, הרגישות הגבוהה של אלגוריתם ה-watershed לקיומן של נקודות מינימום מקומיות ברמות האפור של התמונה המנותחת, אף כי בתמונת המטבעות ניתן לזהות ארבעה תחומים החופפים בקירוב לארבעת המטבעות.



Naive Application of the Watershed Algorithm to the Sobel Gradient of Various Simple Images

עיבוד מוקדם (Preprocessing) לשיפור תוצאות האלגוריתם

תכנית ה-Matlab המצורפת (ws.m) בוחנת שתי אפשרויות דומות להתמודדות עם הקושי שביצירת אגני ניקוז מיותרים לכל נקודת מינימום מקומית. התכנית כתובה בהנחה שהמשתנה A הוא מערך המכיל רמות אפור של תמונה. בתחילת ההרצה מתבקש המשתמש להזין את מספר רמות האפור הרצוי, N. בהתאם לבחירה מיוצרות שתי תמונות חדשות של הגרדיינט.

שיטה 1

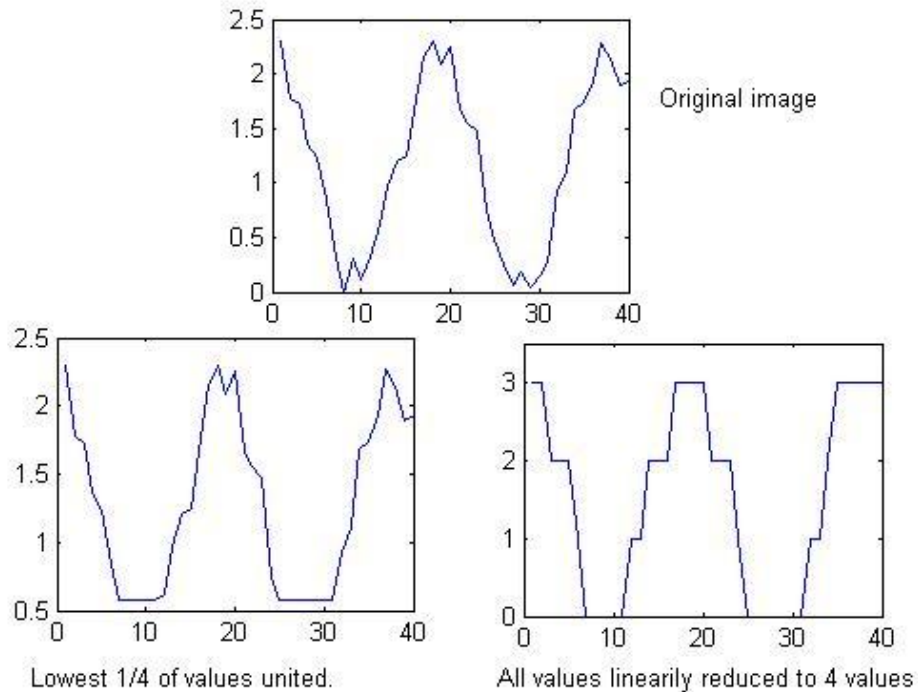
במקרה הזה מאוחדות $1/N$ מרמות האפור הנמוכות ביותר שבתמונת הגרדיינט, לרמת אפור יחידה – בכך נמחקות כמעט לחלוטין נקודות מינימום מלאכותיות באזורים שרמת האפור שלהם בתמונה המקורית אחידה (ולכן הגרדיינט בהם קטן).

שיטה 2

במקרה הזה מתבצעת חלוקה לינארית של כל רמות האפור בתמונת הגרדיינט ל-N רמות אפור בלבד. גישה זו אמנם מובילה לביטולן של נקודות מינימום נוספות אך יוצרת (בייחוד עבור ערכים נמוכים של N) היסטוגרמה דיסקרטית וחדה יותר.

שני התהליכים מודגמים בתרשים החד-מימדי הבא (עבור N=4).

One-dimensional demonstration of the gradient preprocessing for N=4.

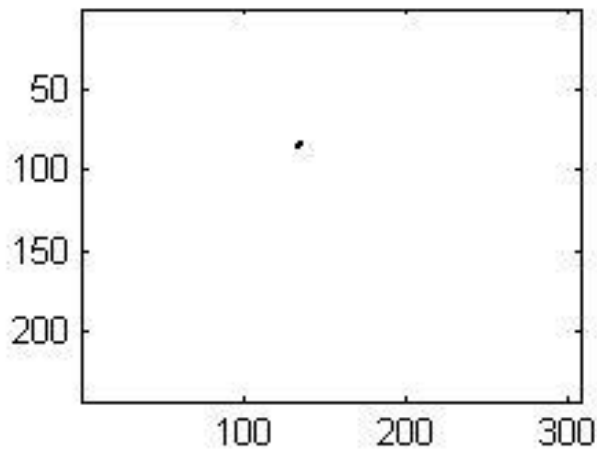


תמונה מקורית

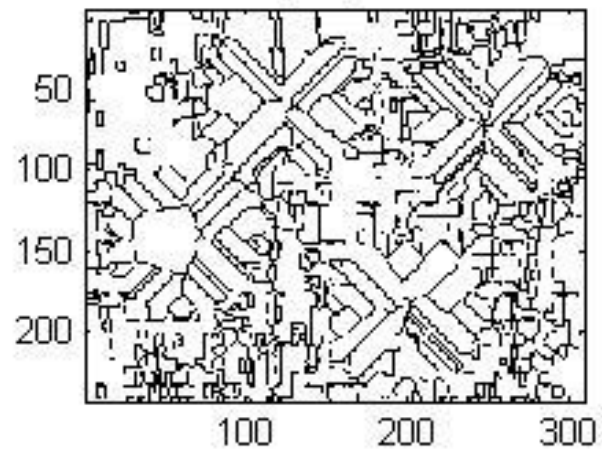


תוצאות ההרצה עבור $N=2$

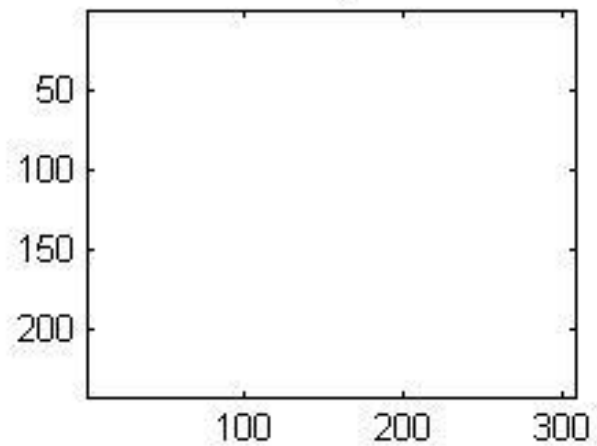
lowest $1/N$ values unified



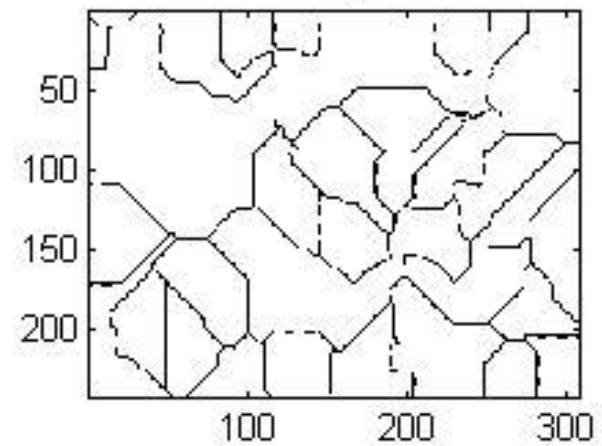
all values grouped in N bins



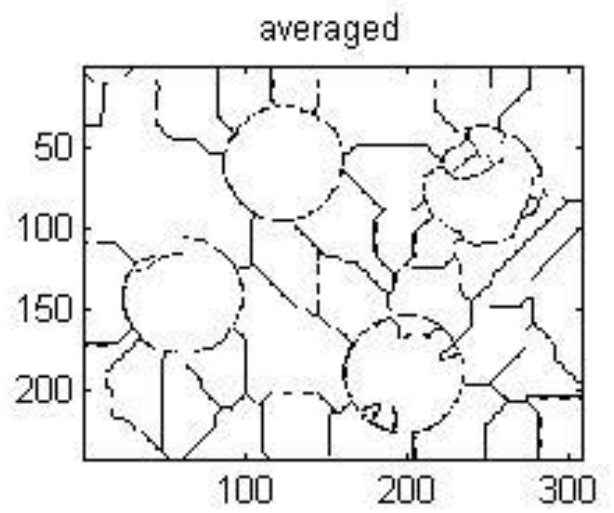
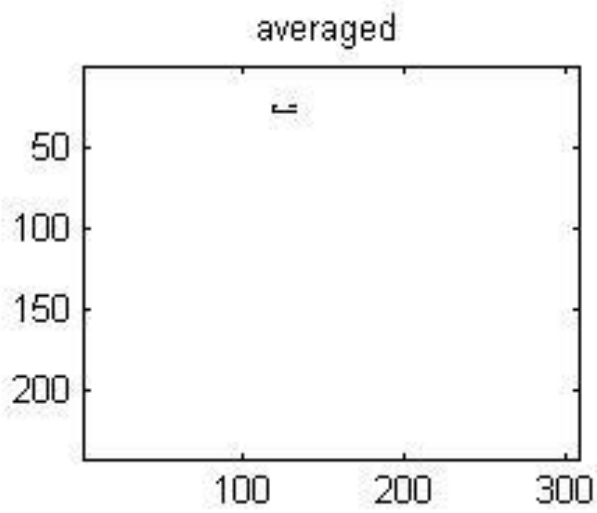
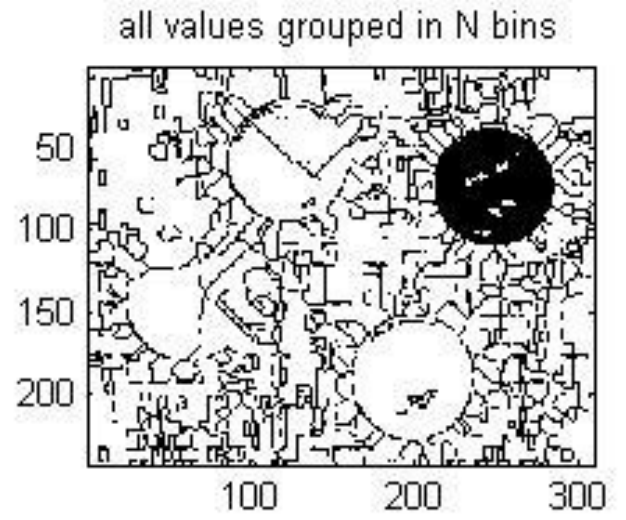
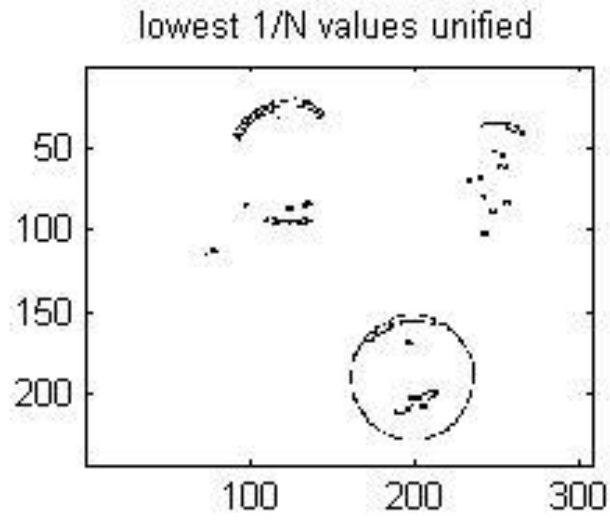
averaged



averaged

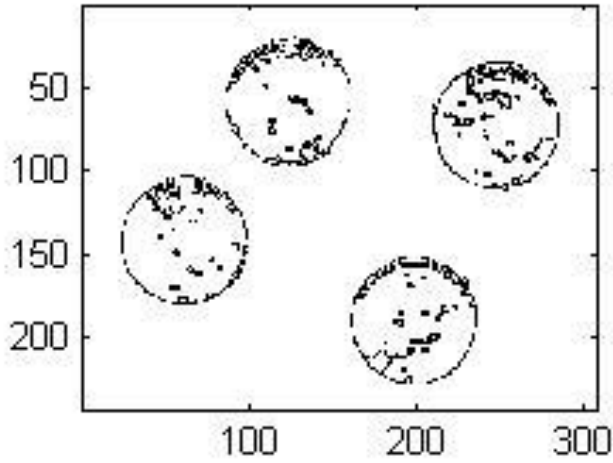


תוצאות ההרצה עבור $N=4$.

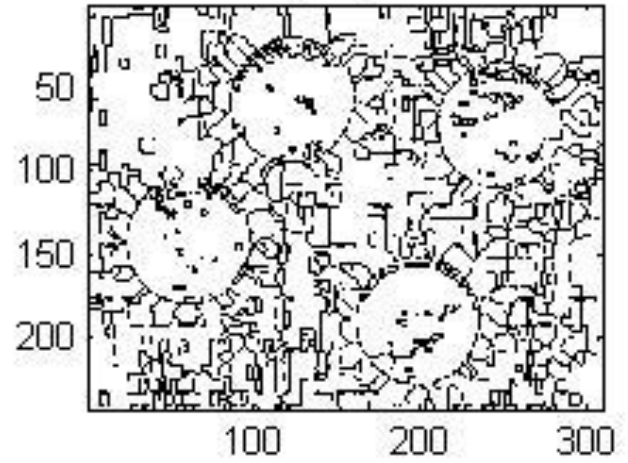


תוצאות ההרצה עבור $N=8$.

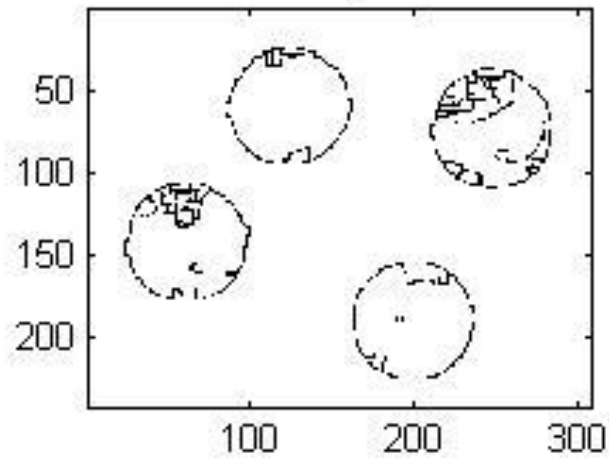
lowest $1/N$ values unified



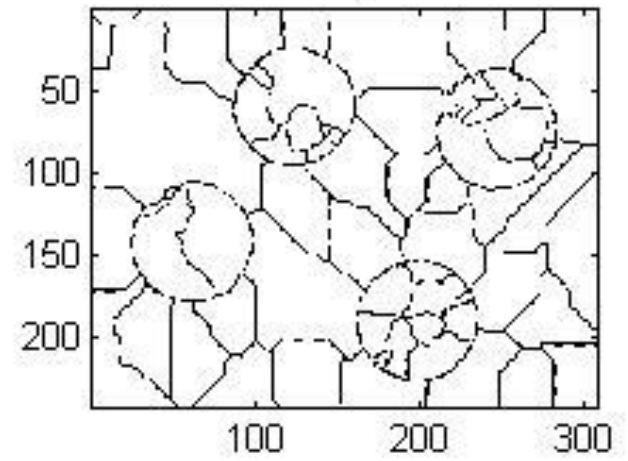
all values grouped in N bins



averaged

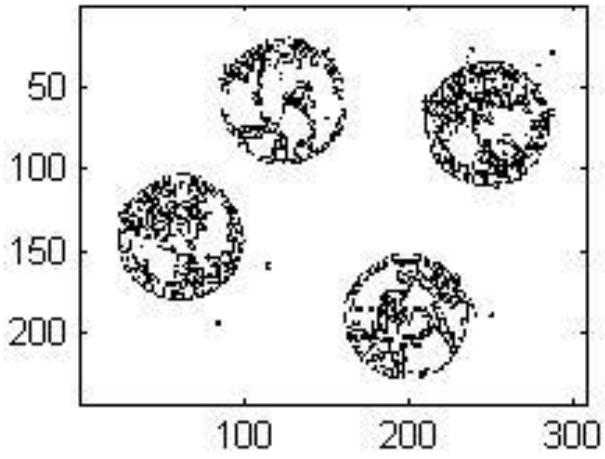


averaged

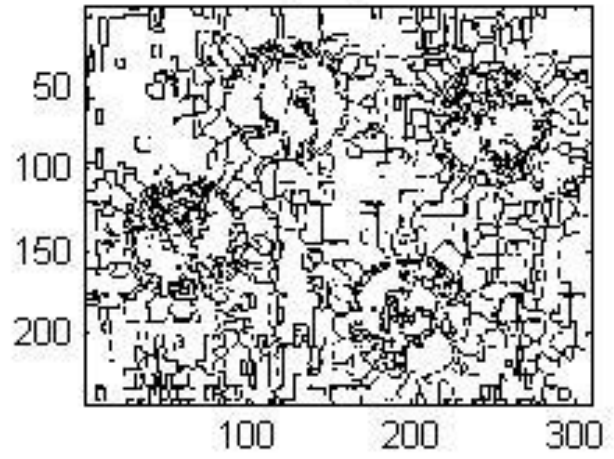


תוצאות ההרצה עבור $N=20$.

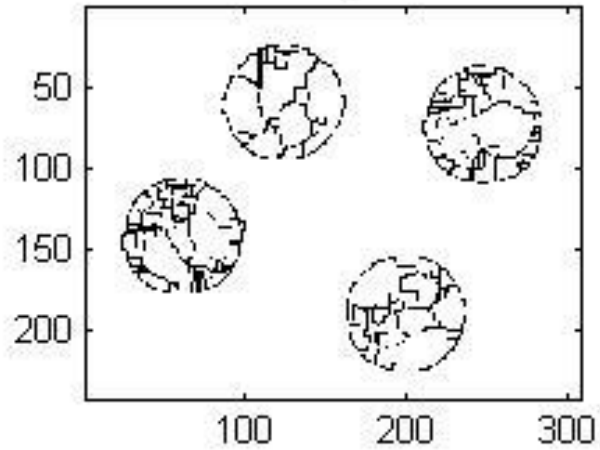
lowest $1/N$ values unified



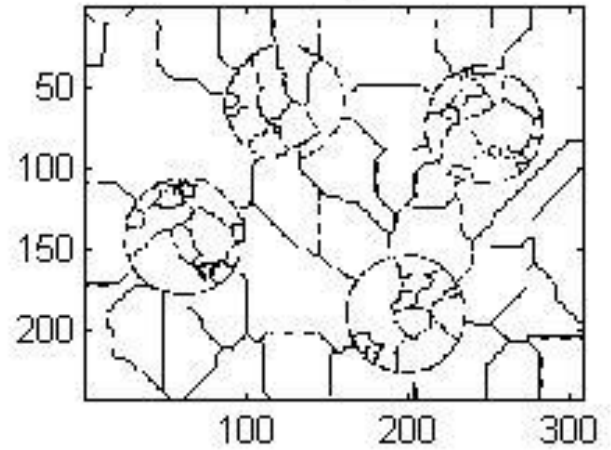
all values grouped in N bins



averaged



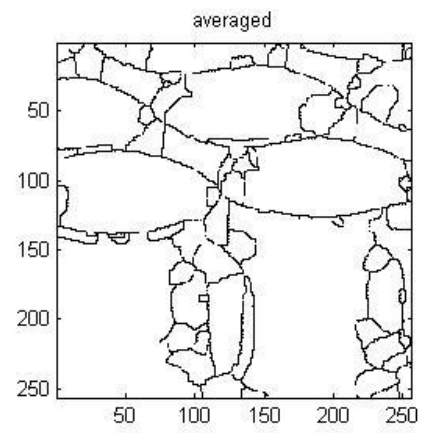
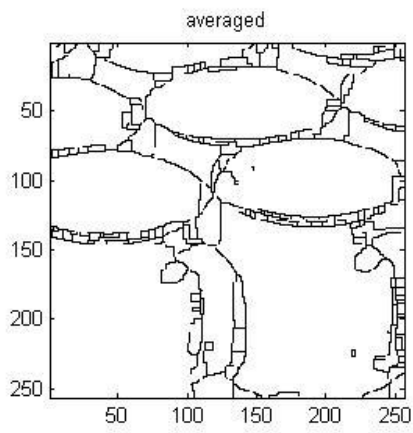
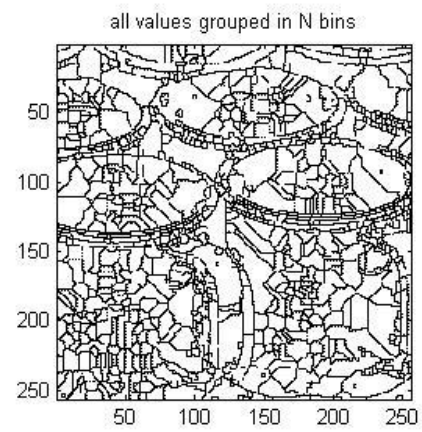
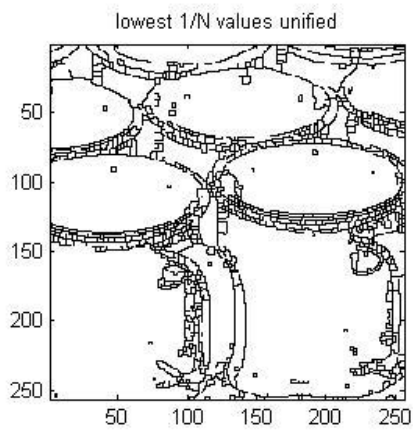
averaged

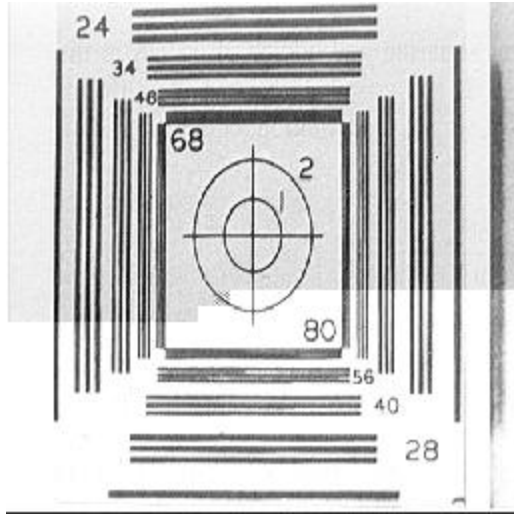


התמונה המקורית



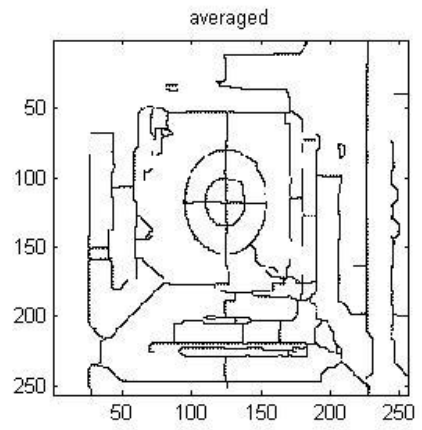
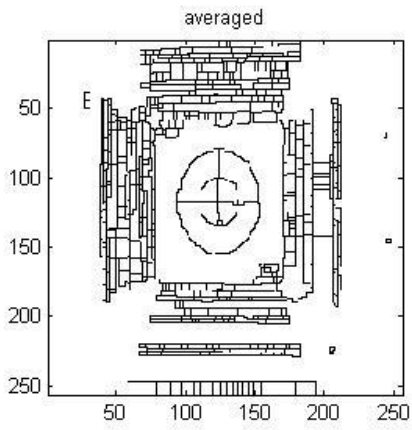
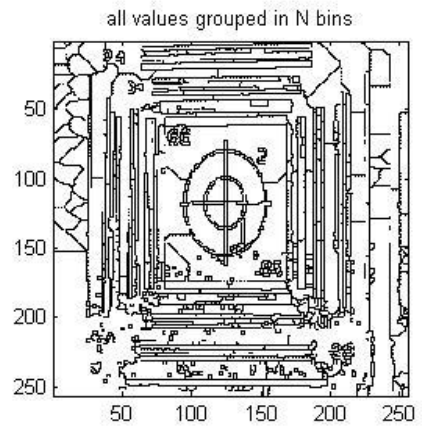
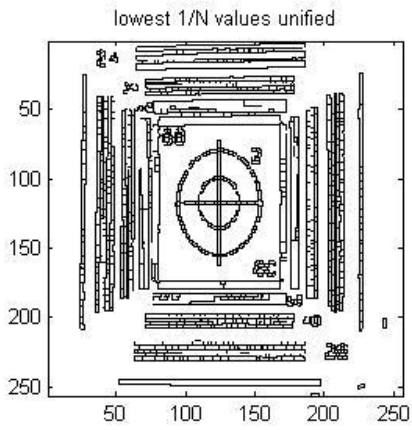
תוצאות ההרצה עבור $N=32$.

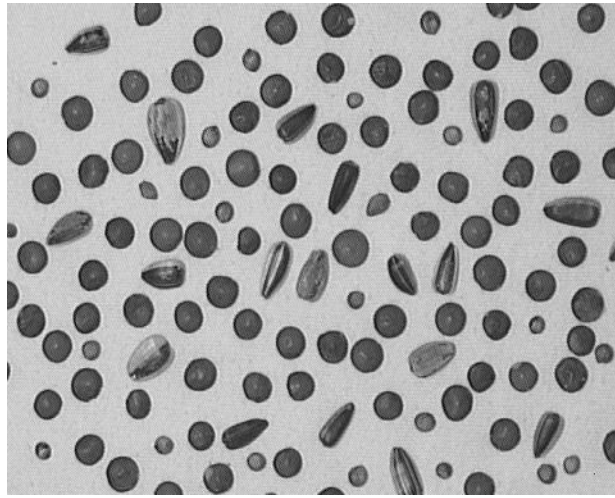




התמונה המקורית

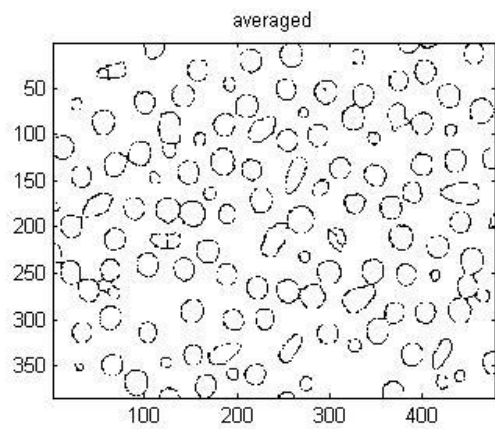
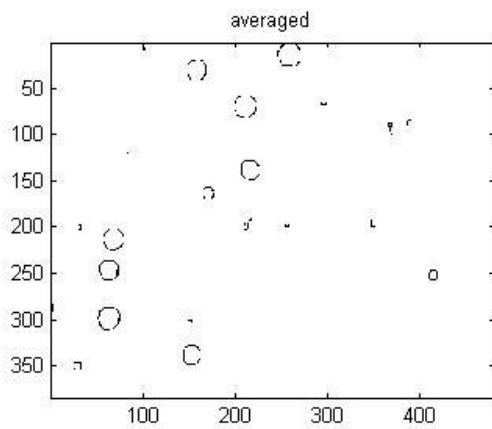
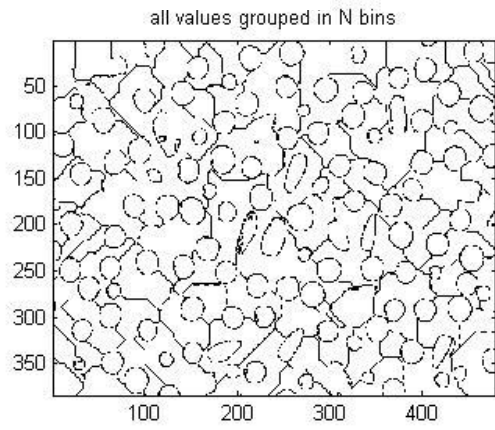
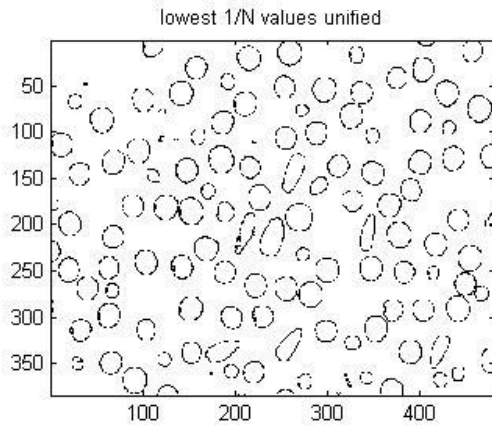
תוצאות ההרצה עבור $N=6$.





התמונה המקורית

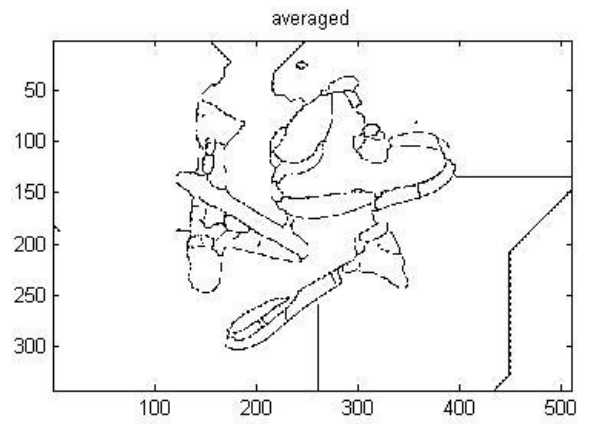
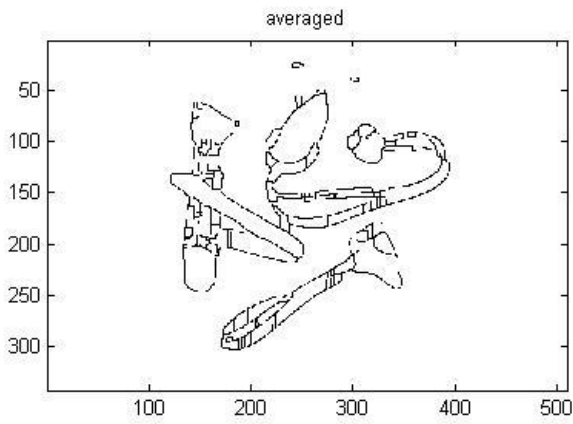
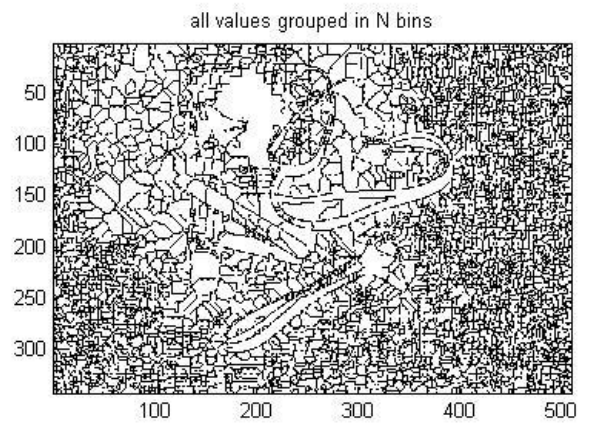
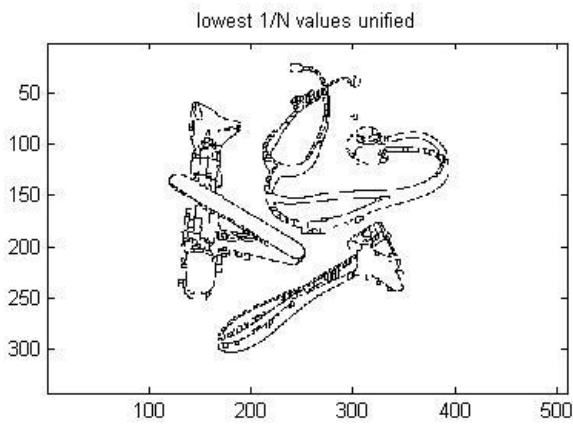
תוצאות ההרצה עבור $N=4$.



התמונה המקורית



תוצאות ההרצה עבור $N=32$.



Comparison of the watershed lines, $N=20$

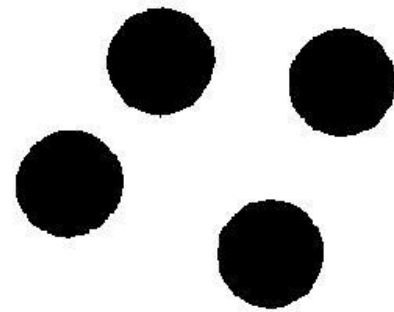
עיבוד מוקדם על ידי הפיכת התמונה לבינרית ופתיחה מורפולוגית

עבור תמונה פשוטה כמו המטבעות, ניתן להשתמש בעיבוד מוקדם משמעותי יותר כדי לקבל תוצאה מדויקת ל-watershed, כיוון שמדובר בתמונה ובה אבחנה ברורה בין אובייקטים לבין הרקע שלהם. לשם כך נעשה המרה של התמונה המקורית לתמונה בינרית, על-ידי מציאת threshold מתאים, ואז נעשה פתיחה מורפולוגית. לאחר מכן תיווצר תמונה שהפעלת ה-watershed עליה תיתן תוצאה מיידית. התהליך מודגם להלן.

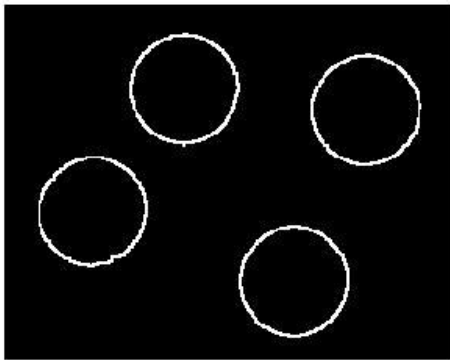
Original image



Binary image, after morphological opening



Sobel Gradient (magnitude)

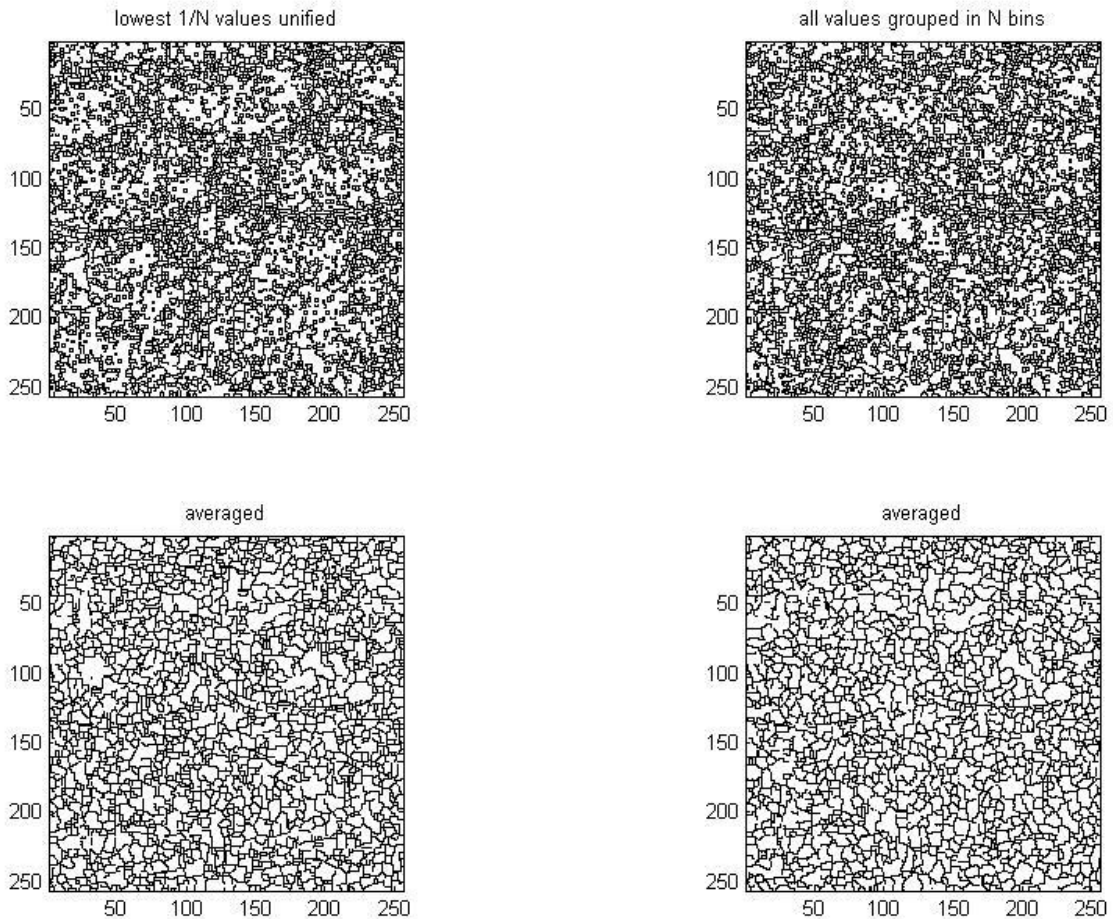


Watershed lines imposed on the original image



רגישות לרעש מסוג Salt & Pepper

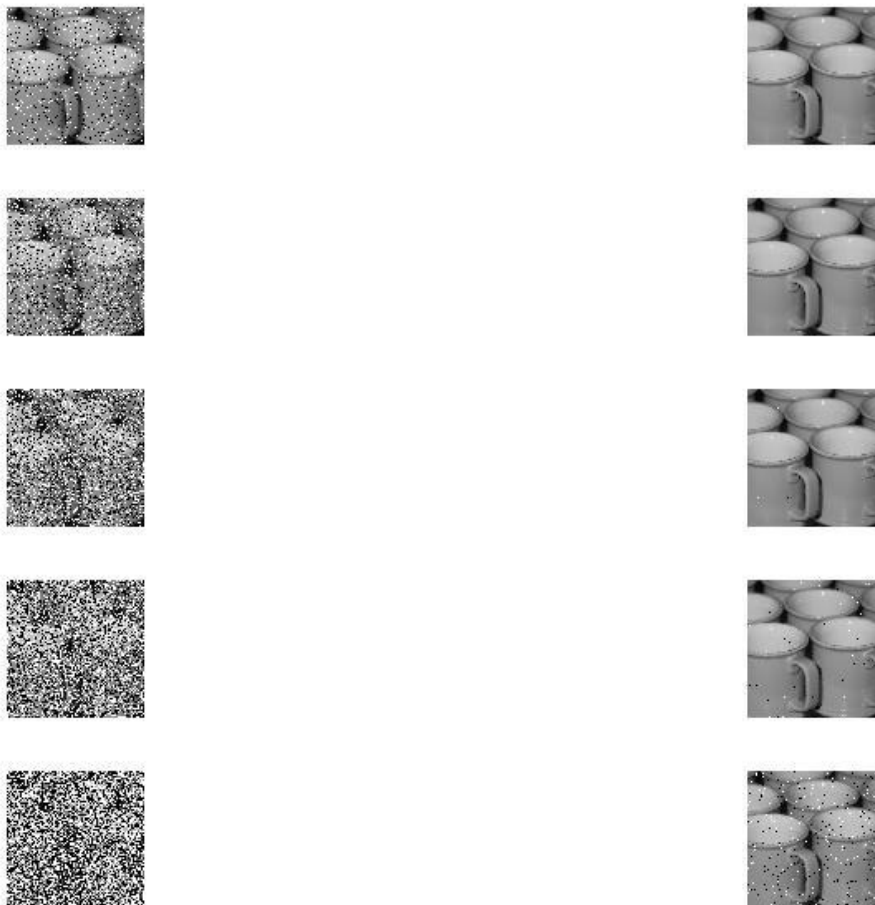
כמו אלגוריתמים נוספים למציאת שפות, אלגוריתם ה-watershed רגיש מאוד לרעשים, נבחן רגישות זו באמצעות טיפול בתמונה ובה רעש מסוג Salt & pepper ברמות שונות. לצורך כך נשתמש בתמונה cups עבורה קיבלנו תוצאות טובות למדי בחלק הקודם, כאשר השתמשנו ב-32 רמות אפור. הרצה של אותה תכנית על התמונה עם רעש s&p ברמה של 0.1 נותנת תוצאות שכמעט ולא ניתן לזהות בהן משהו מן התמונה המקורית כפי שניתן לראות בתמונה שלהלן.



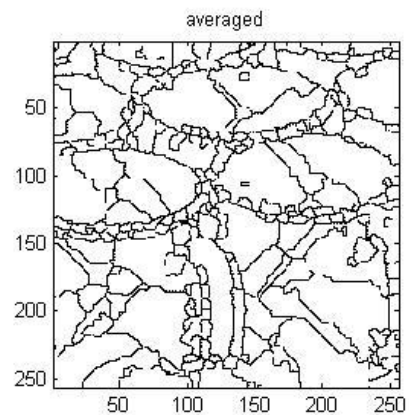
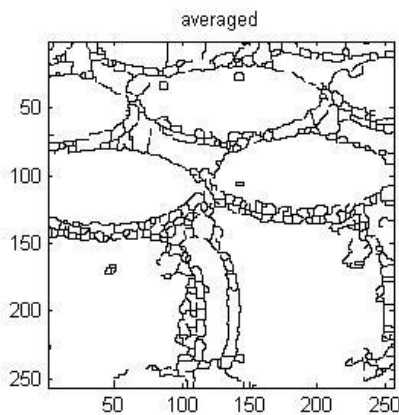
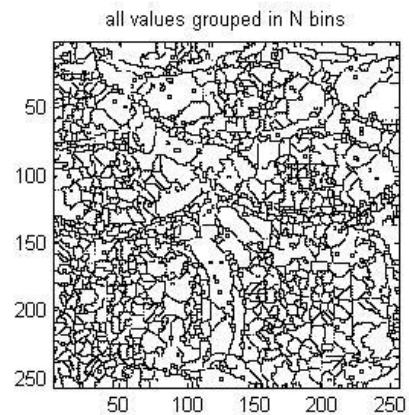
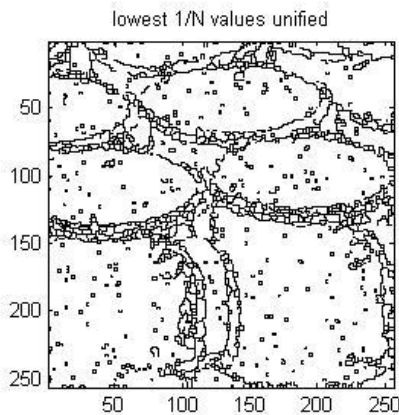
Watershed results with 0.1 salt & pepper noise

יחד עם זאת, הטיפול ברעש מסוג זה הוא פשוט למדי, קובץ ה-Matlab המצורף `sp_remove2.m` פועל על תמונה ברמות אפור ומצליח להסיר חלק ניכר מן הרעש על-ידי החלפה של כל פיקסל בעל ערך 0 או 255 בערך הממוצע של שכניו בלבד (בלי התחשבות בערכו של הפיקסל עצמו, ובלי התחשבות בפיקסלים שכנים בעלי רמת אפור 0 או 255), באופן כזה רק סביבות מלאות של פיקסלי רעש שכנים נשארות לאחר הרצה אחת של התכנית. בתרשים שלהלן ניתן לראות את ההבדל שבין תמונה עם רעש לבין תמונה לאחר ניקוי הרעש עבור רמות שונות של רעש.

Salt and pepper noise of levels 0.1-0.75 removed by `sp_remove_2.m`

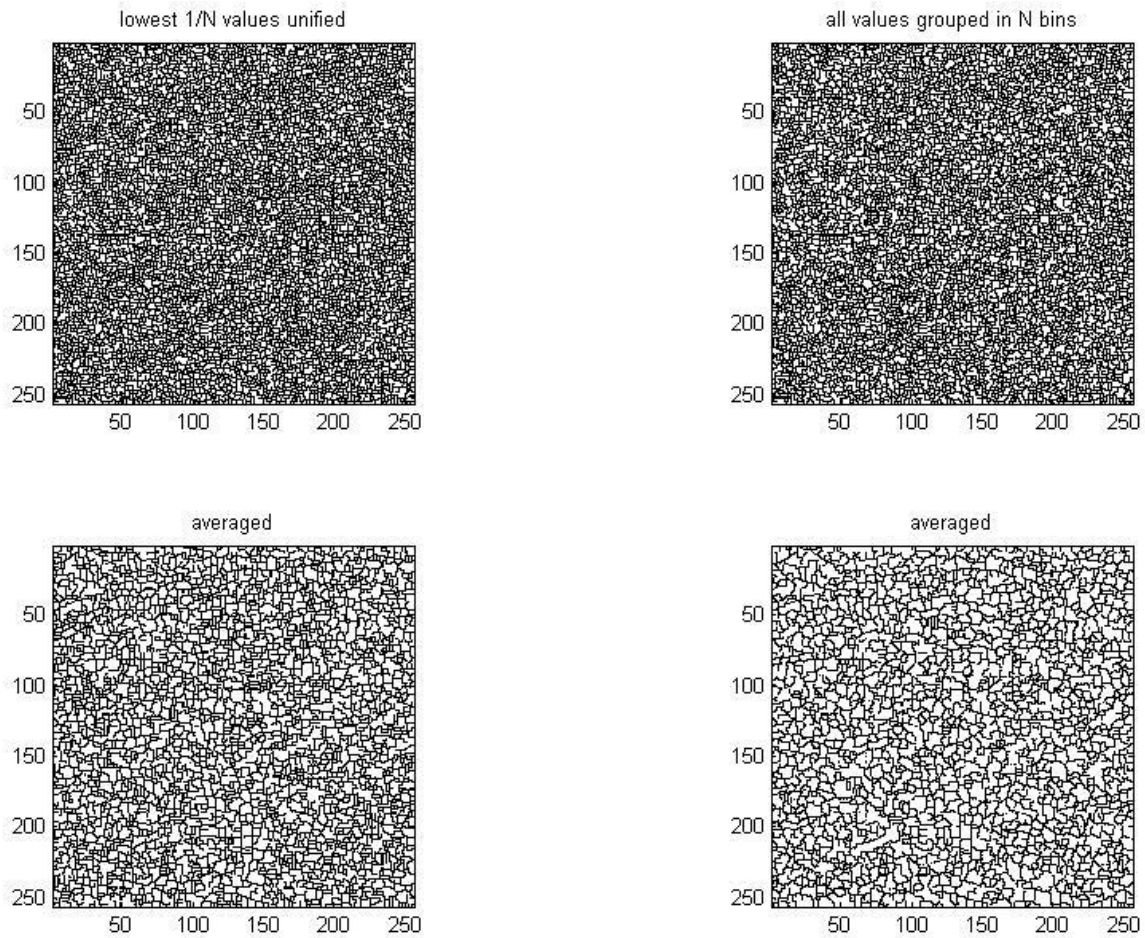


נשים לב כי ההשפעה של רעש מסוג s&p על התמונה היא יצירה של נקודות מקסימום (או מינימום) חדה בפיקסל של רעש. כיוון שאת אלגוריתם ה-watershed אנחנו מריצים על גרדיינט התמונה (בערך מוחלט) ולא על התמונה המקורית, כל פיקסל של רעש יתבטא במסגרת של פיקסלים בהם הגרדיינט גדול מאוד (השכנים הקרובים), בעוד שבפיקסל הרעש עצמו, כנקודת מקסימום/מינימום יתקבל ערך נמוך מאוד לגרדיינט (בהנחה שפיקסל הרעש אינו נמצא דווקא על שפה בין שני תחומים). מן התיאור, ברור שרעש מסוג זה ייפתר על-ידי ביצוע פשוט של ממוצע לתמונת הגרדיינט, באופן כזה הפוך פיקסל הרעש עצמו לנקודת מקסימום בתמונת הגרדיינט ואילו שכניו יקבלו ערכי ביניים. כך נשארות אמנם בתמונת הגרדיינט נקודות מקסימום מלאכותיות, אך כיוון שאלה נקודות מקסימום מבודדות הן אינן יוצרות רצף שיכול להוות קו פרשת-מים ולפיכך לא משפיעות כמעט על ריצת האלגוריתם. יחד עם זאת, השימוש בממוצע "מורח" את השפעות הרעש ויכול ליצור מגע בין אזורי רעש שהיו מבודדים בתמונה המקורית וליצור קווי watershed מלאכותיים. התוצאות מודגמות בתמונות שבעמוד זה. ניתן לראות כי רעש מסוג salt & pepper אינו מהווה בעיה של ממש עד לרמות גבוהות למדי (60 אחוז מהפיקסלים בתמונה שלהלן).



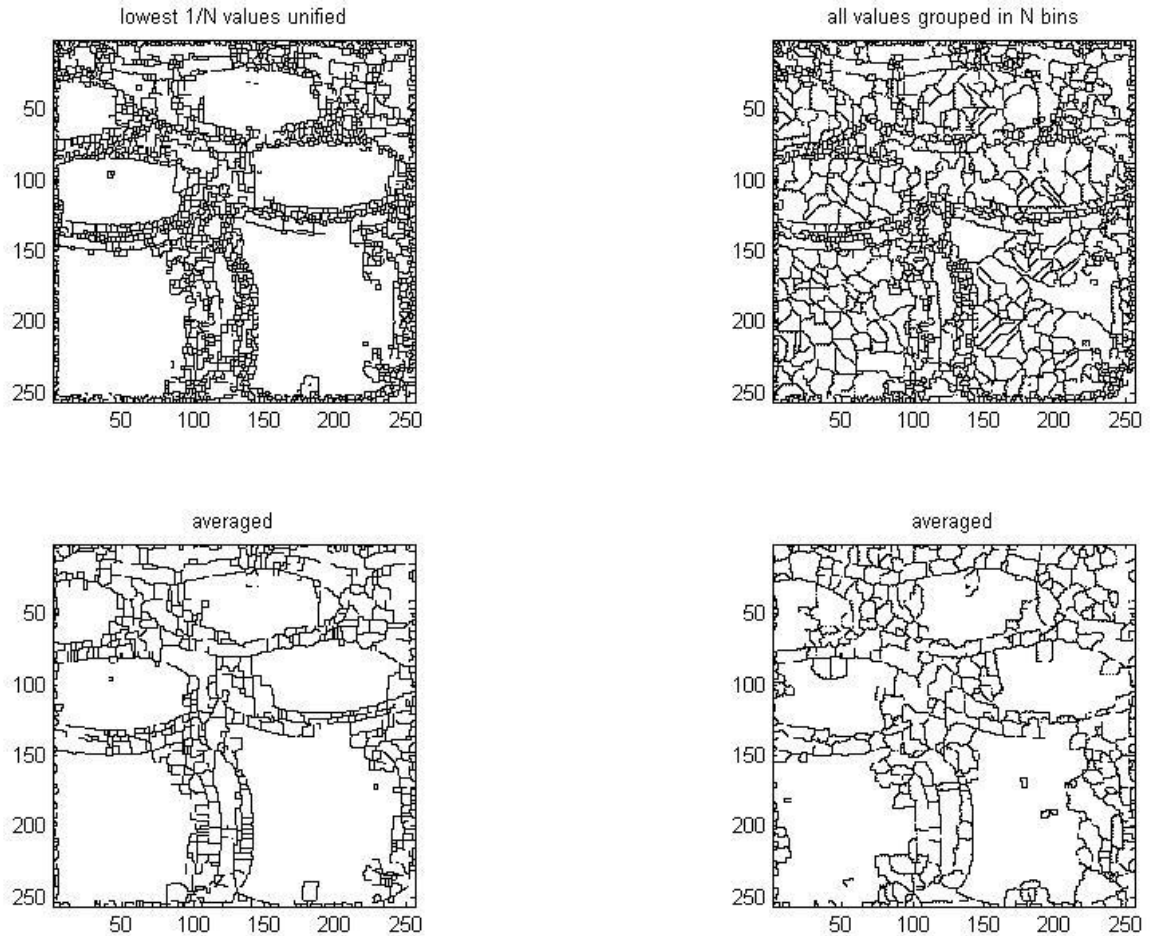
רגישות לרעש גאוסיאני

כפי שהודגם בחלק הקודם, אלגוריתם ה-watershed רגיש מאוד לרעש, נדגים זאת כעת באמצעות ניתוח של תמונה עם רעש גאוסיאני. גם במקרה זה די ברמה נמוכה למדי של רעש לפגוע ביעילות האלגוריתם ולמנוע כמעט לחלוטין זיהוי שפות, כפי שניתן לראות בתמונה הבאה.



Watershed results with small gaussian noise (0,0.01) - No features of the original picture are observable.

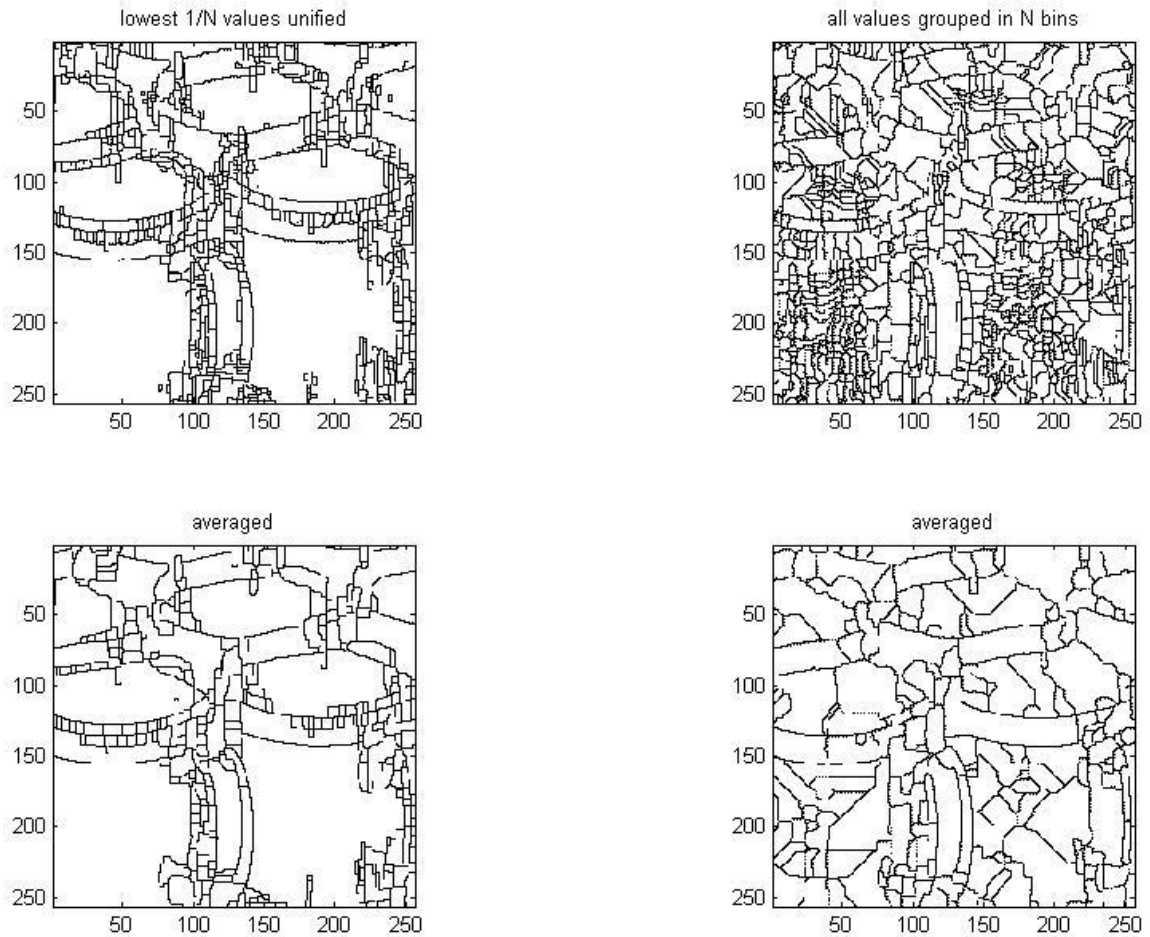
שימוש בפילטר ווינר (על-ידי פקודת ה-wiener2.m – Matlab מצליח להסיר את מרבית ההשפעה של הרעש ולשחזר תמונה שמניבה תוצאות דומות לאלה של התמונה המקורית כפי שמודגם בתמונה הבאה.



Watershed results after gaussian noise and noise reduction by Wiener filtering

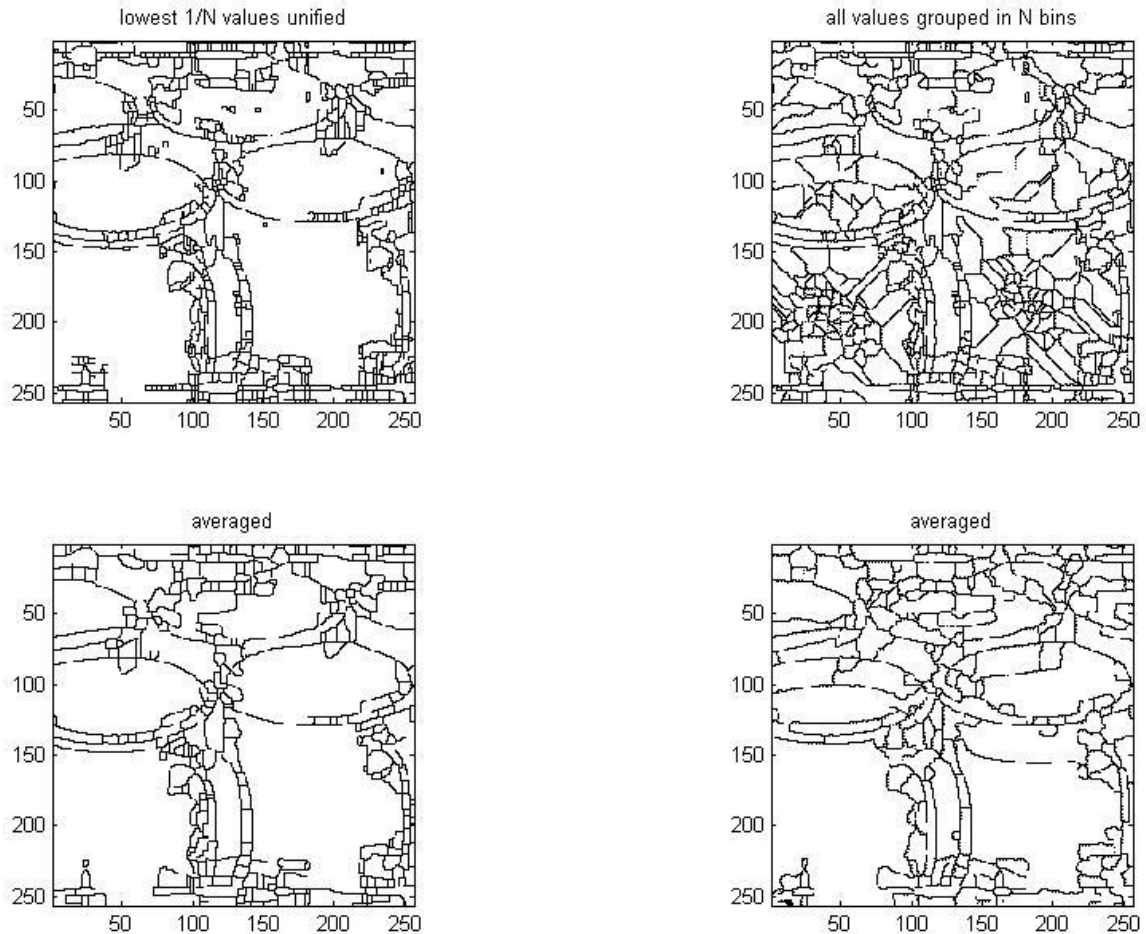
רגישות לטשטוש תמונה באמצעות פילטר תנועה

על-ידי שימוש בפקודת fspecial ליצירת פילטר תנועה קיבלנו טשטוש של התמונה. בדומה לשני המקרים של רעש גם כאן אבד חלק ניכר מן הפרטים בתמונות ה-watershed.



Watershed results after motion filter blurring (20,90)

את טשטוש התמונה ניתן לבטל כמעט לחלוטין על-ידי שימוש בדקונבולוציה לקבלת התוצאות שבתמונה הבאה.



Watershed results after blurring by motion filter (20,90) and deblurring by deconvolution (N=32)

הערה: כפי שמודגם בחלק זה האלגוריתם רגיש מאוד לרעש מכל סוג שהוא (לרבות טשטוש), ההתמודדות עם סוגי הרעש השונים אינה ייחודית לאלגוריתם ה-watershed. לפיכך העדפתי להשקיע יותר מאמץ בחלקה האחרון של העבודה ובה הצעות לשיפור תוצאות האלגוריתם, שכן הצעות אלה נוגעות ישירות לנושא העבודה, ואינן מתבססות על שימוש בפקודות Matlab קיימות.

שימוש ב-Postprocessing לביטול Oversegmentation

כפי שניתן היה לראות בסעיפים הקודמים של עבודה זו, וכפי שמצויין ב-Gonzalez et al., אחת הבעיות העיקריות של שיטת ה-watershed היא חלוקת-יתר של התמונה. בפרט ראינו כי המעבר בין קירוב המאבד כמעט את כל פרטי התמונה לבין קירוב בו מתקבל oversegmentation הוא חד ומהיר מאוד. למעשה, עוד לפני שניתן למצוא את כל השפות כבר מתקבלת חלוקת-יתר של אזורים מסויימים בתמונה. בפרק זה אממש שתי גישות שונות לעיבוד של תמונת ה-watershed הסופית, שמטרתן זיהוי של אגני ניקוז מיותרים, והסרה של ה-watershed lines המפרידים ביניהם. שתי הגישות מצריכות בניה של בסיס-נתונים לגבי אגני הניקוז ולגבי הפיקסלים המרכיבים את קווי ה-watershed. לצורך ההסבר נזכיר כי פקודת ה-watershed מחזירה תמונה (בגודל התמונה המקורית) ובה לכל פיקסל מספר שלם – מספר אגן הניקוז אליו משתייך הפיקסל (לערכו של המספר אין משמעות מלבד ההבחנה בין אגני הניקוז השונים), פיקסלים שאינם שייכים לאף אחד מאגני הניקוז (כלומר מהווים את ה-watershed lines) מקבלים את הערך אפס. בהינתן תמונה מקורית ותוצאת ה-watershed שלה קל לייצר את שני מבני הנתונים הבאים.

יצירת בסיס נתונים לאגני הניקוז השונים

הקובץ basins.m מייצר בסיס נתונים הנוגע לכל אגני הניקוז, עבור כל אגן ניקוז נציין את:

1. "גובהו" של הפיקסל הנמוך ביותר באגן הניקוז.
2. סכום ה"גבהים" של כל הפיקסלים באגן הניקוז.
3. מספר הפיקסלים באגן הניקוז.

נשים לב כי מנתונים 2 ו-3 ניתן לחשב את ה"גובה" הממוצע של פיקסל באגן הניקוז. (כיוון שהניתוח מתבצע על הגרדיינט ולא על התמונה המקורית העדפתי להתייחס לערכים כאל "גובה" ולא כאל רמת-אפור).

בסיס נתונים זה נוצר על-ידי מעבר פשוט על כל הפיקסלים בתמונת ה-watershed במקביל לתמונה המקורית עליה הורץ האלגוריתם, כלומר תמונת הגרדיינט.

יצירת מטריצת שכנות

הקובץ neighbors.m מייצר מטריצת שכנות N . כיוון שמספר אגני הניקוז השונים יכול להיות גבוה מאוד (בשל בעיית ה-oversegmentation) המטריצה המתקבלת עלולה ליצור בעיות בהקצאת זיכרון. כדי למנוע בעיות מעין אלה מומשה המטריצה N כמטריצה דלילה, תחת ההנחה שהמספר הממוצע

של שכנים לכל אגן ניקוז אינו עולה על עשרה (מתוך אלפי אגני ניקוז אפשריים). האיבר הכללי במטריצה N_{ij} מוגדר כאפס אם אגני הניקוז i ו- j אינם שכנים, וכגובה של הנקודה הנמוכה בקו ה-watershed המפריד ביניהם כאשר הם כן שכנים. מטריצת השכנות מהווה אם כך מדד למידת הניתוק שבין שני אגני ניקוז שכנים ויכולה לשמש לאיחוד אגני ניקוז שונים. נשים לב כי קווי ה-watershed הם קווים גבוהים בתמונת הערכים המוחלטים של הגרדיינט ולכן אין אפשרות שערכה של נקודה מתוכם יהיה אפס.

איחוד אגני ניקוז נפרדים – שלושה קריטריונים

הקבצים basins_union.m, basins_union_2.m ו-basins_union_3.m משתמשים בשני מבני הנתונים שלעיל (שמתקבלים מ: basins.m, neighbors.m) כדי ליצור מטריצת שכנות דלילה, U . במטריצה זו ערכו של האיבר U_{ij} הוא 1 אם האגנים i ו- j הם שכנים העונים על הקריטריונים שמפורטים בתכניות ה-basins_union ו-0 אחרת.

קריטריון ראשון

בקובץ basins_union.m מוגדרים כשכנים לאיחוד כל שני אגני ניקוז שכנים שהפרש הגובה בין הנקודה הנמוכה ביותר המפרידה ביניהם לבין הנקודה הנמוכה באחד מהם נמוך מסף הנתון לבחירת המשתמש. כיוון שההשראה לשיטת ה-watershed הוא מתחום הגיאוגרפיה ניתן לחשוב על שיטת ה-postprocessing הזו כעל איחוד של אגני ניקוז על-ידי הגדרת עומק מינימלי לאגן ניקוז, כאשר אגן ניקוז שאינו עונה על קריטריון העומק המוגדר מאוחד עם אגן הניקוז השכן.

קריטריון שני

בקובץ basins_union_2.m מוגדרים כשכנים לאיחוד כל שני אגני ניקוז שההפרש בין גובה הנקודה הנמוכה ביותר המפרידה ביניהם לבין גובהו הממוצע של אחד מהם לפחות נמוך מסף הנתון לבחירת המשתמש. עבור basins_union_2.m ניתן לבחור את הסף להיות אפס כדי למנוע מצב של אגן ניקוז שגובהו הממוצע עולה על זה של ה-watershed line המפריד בינו לבין אגן ניקוז שכן.

נמחיש את שני הקריטריונים הראשונים באמצעות תרשים חד-מימדי פשוט:

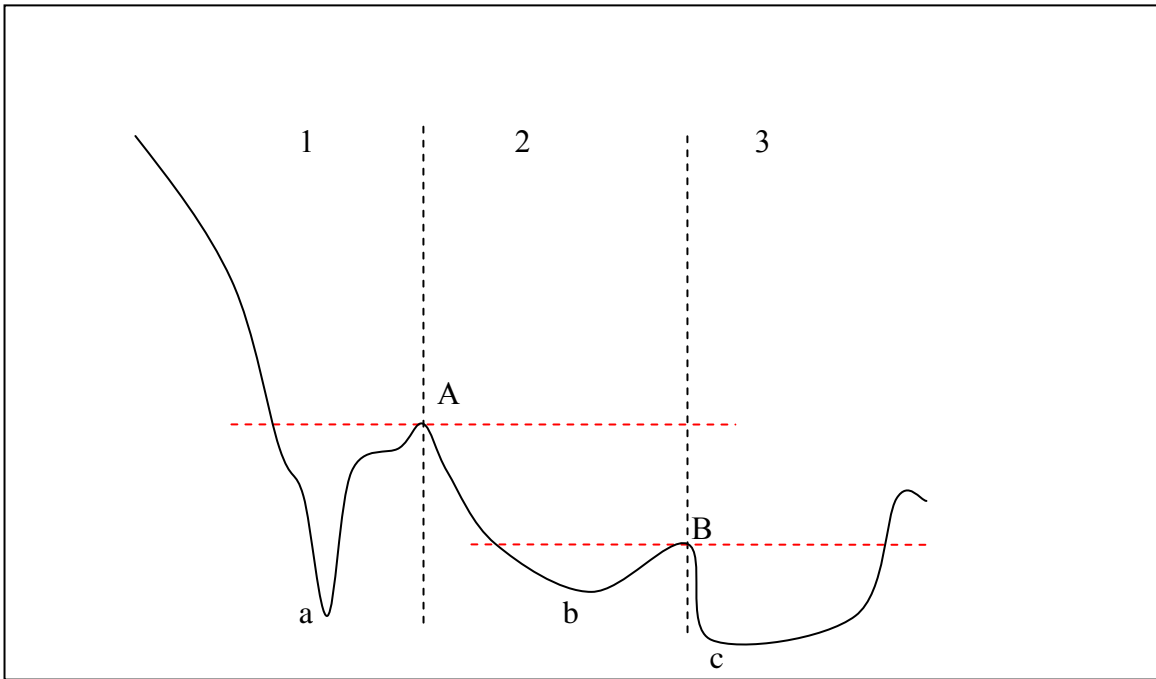
הקווים האנכיים מחלקים את התרשים לשלושה אגני ניקוז, ואילו הקווים האופקיים מציינים את גובהה של נקודת ההפרדה בין אגני הניקוז (במקרה הדו-מימדי של תמונה, תוחלף נקודה זו בנקודה הנמוכה ביותר מבין כל נקודות ההפרדה בין שני האגנים).

כאשר נאחד את אגני הניקוז על-פי הקריטריון הראשון, נשים לב שההפרש בין גובהה של הנקודה B (המפרידה בין אגנים 2 ו-3) לבין הנקודה b (הנקודה הנמוכה ביותר באגן 2) הוא נמוך מאוד, ולפיכך די בערך threshold קטן יחסית כדי לאחד את האגנים 2 ו-3. זאת למרות שהפרש הגובה בין B לבין c אינו נמוך (כיוון שלצורך איחוד האגנים 2 ו-3 נבחרת הגבוהה מבין שתי הנקודות b ו- c). נדגיש כי

האיחוד מוגבל לאגנים 2 ו-3 ואין משמעותו ביטול כל הגבולות שבין אגן 2 לאגנים אחרים. נשים לב לכך שבאגן הניקוז 1 יש מעין "בור" עמוק וחד בנקודה a, קיומו של בור זה ימנע את איחוד האגנים 1 ו-2 עד לערך threshold גבוה (הפרש הגבהים בין A לבין b).

באיחוד אגני ניקוז על-פי הקריטריון השני (הממומש ב-basins_union2.m) תהיה השפעתו של הבור בנקודה a קטנה בהרבה, כיוון שלמרות עומקו, העובדה שהוא צר מאוד מצמצמת מאוד את השפעתו על הגובה הממוצע של אגן 1. כיוון שהמשכו של אגן 1 שמאלה גבוה מאוד נקבל כי גובהו הממוצע של האגן עולה על גובהה של נקודת ההפרדה A ולכן בשיטה זו יאוחדו האגנים 1 ו-2 גם עבור ערך threshold שלילי.

מן הדיון הקצר שלעיל ומן התרשים החד-מימדי ברור כי שני הקריטריונים מניבים תוצאות שונות (על פי הקריטריון הראשון יאוחדו האגנים 2 ו-3 ראשונים, ואילו על פי הקריטריון השני דווקא האגנים 1 ו-2 הם שיאוחדו ראשונים). ניתן כמובן לנסות ולשלב את שני הקריטריונים.



קריטריון שלישי

בקובץ basins_union_3.m מוגדרים כשכנים לאיחוד כל שני אגני ניקוז שכנים אם שניהם קטנים בשטחם מסף הנתון לבחירת המשתמש ללא תלות בגובה הקו המפריד ביניהם. שיטה זו, למרות שאין לה הצדקה "גיאוגרפית" מושתתת על הבחנתי כי אזורים רבים בהם מתקבל oversegmentation מאופיינים בצבר צפוף של אגני ניקוז בעלי שטח קטן מאוד. ניתן כמובן להרחיב את שיטות ההגדרה ולשלב קריטריונים שונים. בעבודה זו הגבלתי את עצמי לבחינה ראשונית של שלוש אפשרויות אלה – כל אחת בנפרד.

מחיקה של נקודות מקווי ה-watershed.

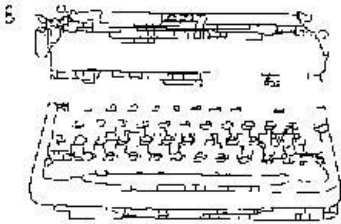
גישה נוספת ל-postprocessing של תמונת watershed היא מחיקה של נקודות בודדות המפרידות בין אגני ניקוז ולא איחוד מלא של אגני ניקוז שכנים. שיטה זו ממומשת בעזרת הקובץ ws_pixels.m המייצר מבנה נתונים ובו רשימת כל נקודות ה-watershed lines וההפרש בין גובהן לבין הנקודה הנמוכה ביותר באגני הניקוז השוכנים לידה. שיטה זו בניגוד לקודמות שצוינו אינה שומרת על מבנה תמונת ה-watershed וזאת כיוון שהיא מוחקת פיקסלים בודדים ולא מאחדת באופן מלא שני אגני ניקוז שכנים.

נדגים את שיטות ה-postprocessing על התמונה typewrtr.jpg. בשלב ראשון נריץ את התכנית ws.m עם מספרים שונים של רמות אפור. כיוון שגודלם של מבני הנתונים שצוינו לעיל תלוי במספר אגני הניקוז כמו גם באורכם הכולל של ה-watershed lines נבחר תמונה שבה תופעת ה-oversegmentation אינה קיצונית מידי. בבחירה של 16 רמות אפור ומיצוע של תמונת הגרדיינט מתקבלת תמונה ובה זיהוי טוב של השפות עם oversegmentation בעיקר באזור המקשים ובקצה העליון של מכונת הכתיבה. מספר אגני הניקוז הכולל בתמונה הוא 433 ומספר הפיקסלים ב-watershed lines הוא 8312, בשני המקרים מדובר במספרים שאינם גבוהים מידי לביצוע postprocessing בזמן וביעילות סבירים.

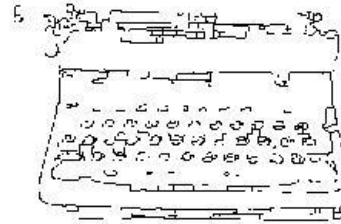
בתמונות שבעמודים הבאים ניתן להשוות את התוצאות של ארבע שיטות האיחוד עבור ערכי סף שונים. ניתן להבחין כי רבים מאגני הניקוז המאוחדים משותפים לכל שלוש השיטות הראשונות (והקווים המפרידים אותם נמחקים כמעט לחלוטין בשיטה הרביעית), אגני ניקוז כאלה מהווים מקרים ברורים של מינימום מקומי רדוד שאין משמעות לזיהויו. בכל השיטות ניתן להבחין כי גם עבור בחירות נמוכות יחסית של רמת threshold חלה ירידה ניכרת ברמת ה-oversegmentation ללא פגיעה בזיהוי השפות האמיתיות (בחירה של threshold גבוה מידי עלולה לגרום פגיעה בזיהוי השפות). יחד עם זאת, כפי שצוין לעיל כדי להגיע לתוצאות אופטימליות מומלץ לשלב את כל השיטות לקבלת קריטריונים מדויקים יותר לאיחוד.



Results of using minimum height and dam's height to remove watershed lines (basins_union.m)



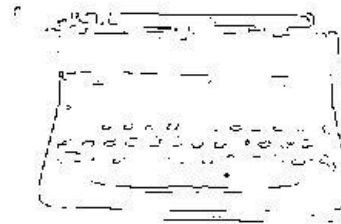
Original watershed image



threshold=30

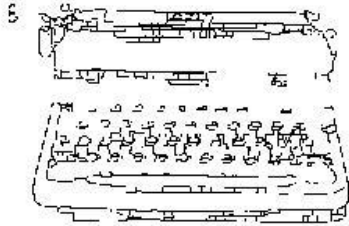


threshold = 75



threshold = 150

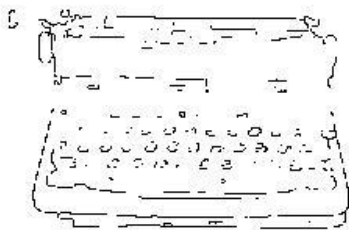
Results of using average height and dam's height to remove watershed lines (basins_union_2.m)



Original watershed image



threshold=0

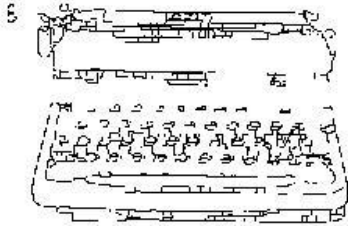


threshold = 20

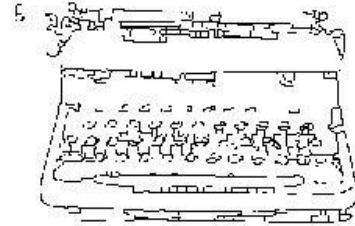


threshold = -20

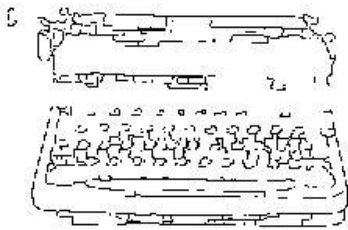
Results of using basins' area to remove watershed lines (basins_union_3.m)



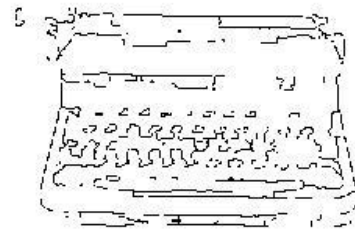
Original watershed image



threshold=20

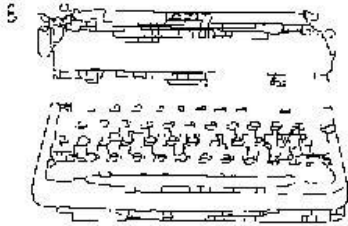


threshold = 50



threshold =200

Removing individual watershed line pixels (using the database created by ws_pixels.m)



Original watershed image



threshold = 50



threshold = 100



threshold = 200

הערה חשובה בנוגע לתמונות שבעבודה: לצערי המרת התמונות לפורמט jpeg והרצון להציג מספר תמונות זו ליד זו גרם לירידה חדה באיכות התמונות . כיוון שבתמונות ה-watershed מוצגים למעשה קווים בעובי של פיקסל יחיד רבים מקווים אלה נראים קטועים. ניתן לראות תמונות אלה באיכות טובה יותר באמצעות קובצי ה-Matlab (.fig) המצורפים.