|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| \\dsp-disk.eng.tau.ac.il\Documents\eeproj\Forms & Important\פרויקטים\הנחיות\Guidelines\Students\ENG_LOGO-01.png | | | **\\dsp-disk.eng.tau.ac.il\Documents\eeproj\Forms & Important\פרויקטים\הנחיות\Guidelines\Students\TAU_EngineeringENG.png** | |
| Neon Color Illusion – Computational model | | | |
| פרויקט מס' 20-1-1-2061  דו"ח סיכום  -סודי- | | | |
| מבצעים: | | | |
|  | עובד חרובי | 305501504 | |
|  | יותם אבן-ניר | 307950881 | |
| מנחים: | | | |
|  | חדוה שפיצר | אוניברסיטת ת"א | |
|  |
| מקום ביצוע הפרויקט:  מעבדת ראייה – אוניברסיטת תל-אביב | | | |

תוכן עניינים

[1 הקדמה................ 3](#_Toc74825045)

[2 מודל חישובי.......... 4](#_Toc74825046)

[3 רקע תאורטי.......... 5](#_Toc74825047)

[3.1 עיבוד תמונות קלאסי 5](#_Toc74825048)

[3.2 שדות גרייה - מנגנונים מנוגדים 5](#_Toc74825049)

[3.3 ניגודיות מרחבית 5](#_Toc74825050)

[3.4 המשכת קוים (Lateral Facilitation Signals) 5](#_Toc74825051)

[3.5 הליך מילוי צבע (Filling-in Process) 6](#_Toc74825052)

[4 שיטות.................. 7](#_Toc74825053)

[4.1 Opponent RFs 7](#_Toc74825054)

[4.2 זיהוי קצוות (Oriented Opponent and Double Opponent RFs) 7](#_Toc74825055)

[4.3 המשכת קוים 7](#_Toc74825056)

[4.4 סף ראייתי 7](#_Toc74825057)

[4.5 הליך מילוי צבע – Filling-In Process 7](#_Toc74825058)

[4.6 פרמטרים 8](#_Toc74825059)

[5 תוצאות................. 9](#_Toc74825060)

[5.1 השלמת קווים 9](#_Toc74825061)

[5.2 מילוי צבע (Filling-in Process) 10](#_Toc74825062)

[5.3 תוצאות סופיות 11](#_Toc74825063)

[6 סיכום, מסקנות והצעות להמשך 11](#_Toc74825065)

[6.1 סיכום 11](#_Toc74825066)

[6.2 השוואה למודלים קיימים 12](#_Toc74825067)

[6.3 מסקנות והצעות 12](#_Toc74825068)

[מקורות 13](#_Toc74825069)

**רשימת איורים**

[איור 1 | דוגמה לתמונה בה מתרחשת האילוזיה NCS 3](#_Toc74826318)

[איור 2 | דיאגרמת בלוקים של המודל החישובי 4](#_Toc74826319)

[איור 3 | תוצאות ביניים של הליך השלמת הקוים (ניחושים מושכלים) 9](#_Toc74826320)

[איור 4 | תוצאות ביניים של הליך המילוי (Filling-in Process) 10](#_Toc74826321)

[איור 5 | תוצאות האלגוריתם 11](#_Toc74826322)

[איור 6 | שעון חול דועך (Double Wedge). 12](#_Toc74826323)

**רשימת קיצורים**

NCS – Neon Color Spreading

DO – Double opponent

RF – Receptive Field

# הקדמה

תופעת ה NCS (Neon Color Spreading) הוגדרה לראשונה בשנת 1975 (Van Tuijl , 1975). האפקט התפישתי מתרחש כאשר יש גירוי ראייתי המכיל רשת קווים בצבע אחיד שבה מספר קווים מקבלים צבע שונה. מחקר התופעה יוביל להבנה משמעותית על תופעות הקורות בתפישת המציאות. (mingolla et al., 1997). הצופה בתופעה רואה התפשטות צבע ניאון באזור הקווים השונים בצבעם בתוךצורה מדומה הנתפשת במוחנו (איור 1). התופעה מעידה על מנגנונים במערכת הראיה המשלימים פרטים על המציאות אותה אנו רואים.

Shape

Description automatically generated

**איור 1** | דוגמה לתמונה בה מתרחשת האילוזיה NCS

התופעה תוארה מספר פעמים ע"י חוקרים בתחום –

* כשני תהליכים שונים (BCS, FCS), האחד של זיהוי הגבולות המדומים והשני התפשטות. (mingolla et al., 1985).
* מודל נוסף המסתמך על מערכת לחיקוי קליפת הראיה של Finkel and Edelman , 1989.

תיאורים אלו הוסברו כמודלים כלליים לתופעה, ולא קושרו לתהליכים ישירים במוח ותורגמו למודל מתמטי.

**מטרת הפרויקט** שלנו הנה לכתוב מודל חישובי לתופעת טבע אניגמטית. על בסיס המודל החישובי נפתח אלגוריתם שבהיתן תמונה סינטטית בה מתרחשת התופעה ידגיש את התופעה על גבי התמונה.

**המוטיבציה** לפיתוח מודל חישובי חדש לתופעה אופטית מגיעה משתי סיבות עיקריות – קידום המדע בתחום חקר הראייה והמוח וביסוס מודל חישובי חדש שיכול להוות בסיס למחקר עתידי בתחומים נוספים, בתחום הראייה ומחוץ לו.

**גישתנו לפתרון הבעיה** הנה שימוש בכלים מעיבוד תמונה קלאסי לזיהוי תופעות בתמונה שיוצרות את האילוזיה NCS. עולם עיבוד התמונה הולך ברובו לפתרונות בגישה של למידת מכונה, ואילו במקרה זה חשיבות המודל החישובי היא התחקות אחר תהליכים שקורים במוח האנושי כאשר הוא נחשף לגירוי שיוצר את האילוזיה. התבססנו על תזה קיימת של מעבדת ראייה באוניברסיטת תל אביב לגבי התהליך שקורה במוח ופירקנו אותו לתתי תהליכים אותם יכולנו לתאר כאלגוריתמים שבסופו של דבר תורגמו לקוד ולמעשה לתוצר של הפרויקט.

# מודל חישובי

המודל החישובי מורכב מאבני בניין מרכזיים: (א) הגירוי ליצירת האפקט (Inducing Stimulus) (ב) שדות גרייה (RFs) מסדר ראשון - כרומטיים ואכרומטיים ברשתית (ג) שדות גרייה מסדר שני (Double-Opponent RFs) רגישים לאוריינטציה (ד) המשכת קווים לפני ניחוש מושכל בקליפת הראייה (Visual Cortex) (ה) זיהוי מקורות חום – קוים אמיתיים וקוים מדומים (קוים מומשכים) (ו) הליך מילוי (Filling-in Process) מחושב ע"י משוות פואסון (ז) התמונה כפי שהיא נתפשת במוח (**איור 1א-ז**).

**א**

**ב**

**ג**

**ד**

**ה**

**ו**

**ז**

Diagram

Description automatically generated

איור 2 | דיאגרמת בלוקים של המודל החישובי: (א) הגירוי. (ב) שדות גרייה (Opponnent RF) – ייצוג המידע ב3 ערוצי מנגנונים מנוגדים (Opponent)- RG, BY, Luminance. (ג) ביצוע זיהוי קצוות לפי אוריינטציה. (ד) המשכת קוים (ניחושים מושכלים). (ה) DO RFs - זיהוי מקורות חום – מקורות אמיתיים ומקורות על בסיס ניחושים מושכלים. (ו) הליך מילוי (Filling-in Process) ע"י משוואת פואסון. (ז) התמונה כפי שנתפשת במח האנושי.

# רקע תאורטי

## עיבוד תמונות קלאסי:

על מנת לדבר על התהליכים שאנחנו מבצעים על תמונות הקלט באלגוריתם שלנו, ראשית נגדיר כלים חשובים בעיבוד תמונות קלאסי עליהם עבודתנו מתבססת.

**- קונבולוציה** (או "קיפול") הנה פעולה בינארית בין סדרות של ערכים או פונקציות. נהוג לסמנה בסימן \* והיא מוגדרת כך (במקרה הבדיד הדו-מימדי):

**(1)**

בעיבוד תמונות קלאסי מבצעים קונבולוציה בין תמונה לבין פילטר (מסנן) לביצוע פעולה לינארית על הפיקסלים של התמונה כתלות בפיקסלים השכנים.

***- פעולות מורפולוגיות*** *הנן פעולות שמבוצעות על תמונה בהתאם לאיזשהו עצם צורני. בעבודתנו עשינו שימוש בהרחבה*

*(Dilation) כפעולה מורפולוגית בינארית שמטרתה ליצור צורות רציפות בתמונה.*

## שדות גרייה - מנגנונים מנוגדים:

בחלקו הראשון של המודל אנו משתמשים ב Opponent Receptive Fields (שדות גרייה מסדר ראשון) כפילטר לזיהוי קצוות לפי שינוי בעצמה. נקבל שלוש תגובות בשלושה ערוצי צבע בRF (Receptive Field) התלויים בהפרשים בין תגובות של מדוכים (תאי ראייה) במרכזו לבין אלו הנמצאים סביב המרכז. נבדיל בין תאים המגיבים לאורכי גל נמוכים (כחול – ), בינוניים (ירוק – ) וארוכים (אדום – ). . חישוב תגובת ערוצי הOpponent נעשה עפ"י נוסחה [4]:

**(2)**

*שדות גרייה מסדר ראשון בעלי אוריינטציה (Oriented Opponent RFs) מאפשרים זיהוי הפרשי עצמה בצבע באותה אוריינטציה.*

## ניגודיות מרחבית - Oriented Double Opponent:

המידע המועבר לקליפת המח הראייתית מה Oriented Opponent RFs מקדד את הניגודיות בעצמת הצבע ולכן במקרה האכרומטי, זה מספיק לזיהוי קצוות. במקרה הכרומטי שדות גרייה מסדר ראשון לא מאפשרים זיהוי הפרשי contrast אלא רק הפרשי עצמה ולא מאפשרים זיהוי קצוות, לכן נשתמש בשדות גרייה מסדר שני – ODO RFs (Oriented Double Opponent) בעלי אוריינטציה אשר מאפשרים לזהות קצוות ושינויים בתמונה.

מתמטית, לזיהוי קצוות לפי אוריינטציה נשתמש בפילטר גבור (Gabor) המוגדר במשוואה **(3)** כתלות ב(x,y) – מיקום ביחס לנקודה כלשהי בתמונה , סטיית תקן של התפלגות גאוסיאנית, פקטור נירמול g ואוריינטציה [1]:

**(3)**

כשמבצעים קונבולוציה של תמונה עם פילטר גבור למעשה מבצעים חישוב מקומי של הגרדיאנטים בתמונה סביב אזור מסוים וזה הוא למעשה כלי לזיהוי קצוות (בהתאם לאוריינטציה ).

## המשכת קוים (Lateral Facilitation Signals):

המידע בקליפת המח הראייתית נאסף משדות הגרייה שברשתית ונסכם כך שמקבלים את סך התגובות של כל הRFs בכל האוריינטציות. אנו מתארים בצורה מתמטית את אוסף התגובות של שדות הגרייה s ע"י ביצוע קונבולוציה של תמונה I עם פילטר G שהוא פילטר גבור [1]:

**(4)**

במשוואה **(5)** אנו מסירים תוצאות שליליות של הפעלת הפילטר שכן בהסתכלות על קצוות ניתן לזהות גרדיאנט חיובי בצד אחד ושלילי בצד שני ולכן נקבל תוצאה חיובית ושלילית לכל קו ואין לנו צורך בזאת – התוצאה החיובית מספיקה לנו לכן נתאר את התמונה הנתפשת c כך:

**(5)**

התמונה שאנו רואים אינה רק מה שנקלט בתאי הראייה שלנו. סכימת התגובות הקלאסיות של שדות הגרייה מתוארות היטב בתמונה c (משוואה 6) אך עפ"י המודל ישנם אותות מתווספים (Additive Signal) [1] – תגובת תאים שכנים לכל שדה גרייה RF בפרופורציה לעצמת התגובה של שדה הגרייה. אותם אותות מתווספים דועכים כשמתרחקים משדה הגרייה, כלומר עצמת התגובה נחלשת. אותות אלו הם לא תגובת שדה גרייה לגירוי ישיר ולכן נתאר אותם כ-"ניחושים מושכלים" בשני כיוונים: כיוון הקו-לינארי [1] ובכיוון האורתוגונלי. "ניחוש מושכל" f דועך בצורה גאוסיאנית כפונקציה של המרחק משדה הגרייה RF שיצר את האות המתווסף [1]:

**(6)**

כאשר הנו שדה הגרייה, הנן הקואורדינטות של, הנו המרחק מ ו הנו רדיוס . הנם פרמטרים המשפיעים על עצמת הדעיכה בהתאם למאפייני התמונה ועצמת הגרדיאנט שיצר את ההמשכה f (גם בכיוון הקו-לינארי וגם בכיוון האורתוגונלי לגרדיאנט).

מכלול האותות המתווספים ("ניחושים ומשכלים") בנקודה (x,y) במרחב מתואר כסכום האותות המתווספים כתוצאה מגירוי של כל שדות הגרייה השכנים לנקודה זו:

**(7)**

לשדות הגרייה קיים סף ראייתי כך שרק גירוי בעצמה גבוהה מהסף יוצר בתגובה שליחת אות משדה הגרייה למח. לכן סך האותות המתווספים הנו למעשה [1]:

**(8)**

בתמונה אנו רואים את תוצאות גירוי שדות הגרייה בנוסף לסך האותות המתווספים ולכן התמונה מתוארת כ:

**(9)**

## הליך מילוי צבע (Filling-in Process):

*מילוי צבע במוח נעשה כתוצאה משינוי חד בצבעוניות בין מרכז שדה גרייה לסביבתו [2]. אנו מחשבים את פעפוע הצבע לתוך הצורה בעזרת נוסחת פואסון [4]:*

***(10)***

*אנו יכולים לחשב זאת ע"י ביצוע קונבולוציה עם פילטר גבור Gעל שני הצירים על גירוי Trig שהוא מקור החום (הקונטור של הצורה אליה הצבע מפעפע) [4]:*

***(11)***

*במקרה של NCS נתעניין בערוץ ה Luminance שכן גוון המילוי יהיה כגוון הצורה שנוצרה בשלב השלמת הקוים:*

*“The chromatic channels are mediated by the Luminance channel (the achromatic channel). This assumption is supported by the observation that there is color spreading in response to a stimulus where both the IC and OC have the same color (hue) but a different luminance.” (Devinck et al., 2006)*

# שיטות

על מנת לממש את האלגוריתם השתמשנו בשפת python .

השתמשנו בספריות :

* OpenCV
* Skimage
* colorsys
* SciPy, NumPy

## Opponent RFs:

בהינתן תמונת קלט בקידוד RGB אנחנו מתמירים את התמונה לערוצי Opponent בעזרת פונקציית פייתון כאשר הטרנספורמציה מייצוג RGB לייצוג Opponent הנו [3]:

***(12)***

*כאשר הנם ערוצי הצבע בתמונה המתקבלת לאחר הטרנספורמציה ו הנו ערוץ ה Luminance.*

## זיהוי קצוות - Oriented Opponent and Double Opponent RFs:

זיהוי הקצוות בתמונה באוריינטציה כלשהי מחושב ע"י קונבולוציה של התמונה עם גרעין גבור (Eq. 3).

עמדו בפנינו שתי אפשרויות לגילוי הקצוות בכל האוריינטציות: לחשב גרעין גבור לפי אוריינטציה (זוית) ולכתוב את כל התכנית בצורה דינאמית ובתלות בזוית או לסובב את התמונה לפי אותה זווית ולבצע את כל החישובים בצורה קבועה, לפי זוית 0. בחרנו לסובב את התמונה על מנת לפשט את התכנית, שכן ישנם צעדים שהם קשים לחישוב באוריינטציה שונה מאפס.

## המשכת קוים:

את המשכת הקוים ביצענו בעזרת הוספת שני קוים דועכים בצורה גאוסיאנית (Eq. 6) בנקודות הקצה של הקצוות שגילינו בשלב הקודם (אלו הם הRFs שיוצרים את האותות המתווספים). מכיוון שסובבנו את התמונה, בכל אוריינטציה אנו מוסיפים את הקוים בשני צירים - קו אנכי וקו אופקי.

בעבודתנו ביצענו קירוב וקבענו . את סטיית התקן אנו מחשבים בצורה דינאמית כתלות בעצמת הגרדיאנט שהתגלה עבור אותו RF. אורך ה"ניחוש המושכל" נקבע כפרמטר בתחילת התכנית. אנו משתמשים בפונקציות של ספריית Numpy לחישוב הגאוסיאן.

## סף ראייתי :

הסף הנו פרמטר שנקבע בתחילת הריצה ומצאנו כי עבור תמונות שונות יש לקבוע ערכים שונים עבורו, כאשר ערכים אפשריים הנם ערכים שלמים בטווח . את פעולת הסף אנו מבצעים בעזרת פונקצייה מספריית פייתון cv2 של OpenCV.

## הליך מילוי צבע – Filling-In Process:

מילוי הצבע מחושב על פי נוסחת פואסון על מקורות החום [4] שהם למעשה אותם קונטורים שנוצרו בהליך המשכת הקוים. בסימולציות שהרצנו ביצענו נגזרת שניה על רקע לבן ולכן ההפרשים תמיד היו בין צבע כלשהו ללבן. מכך הבנו כי ניתן לפשט את החישוב של נוסחת פואסון ע"י התייחסות לאחד הגדלים כקבוע וביצענו קירוב לינארי של נוסחת פואסון

(10Eq. ). את הצביעה אנו מוסיפים לתמונה הסופית עם סטורציית צבע נמוכה יותר מהצבע של מקור החום, הסטורציה נקבעת כפרמטר בתחילת התכנית.

## פרמטרים:

עבור התוצאות המוצגות באיור 5 השתמשנו בערכים הבאים -

– קבענו . גילינו כי עבור גודל זה אנו מקבלים תוצאה קרובה ביותר לתוצאה הנראית לעין. עבור מספרים גדולים יותר מקבלים תמונה רועשת ואילו עבור קטנים יותר מידע רב נעלם מן התמונה.

**גודל גרעין גבור** - השתמשנו במטריצה בגודל 5x5 פיקסלים בכל הריצות שלנו.

**הפרש זויות** – אנו מבצעים גילוי קצוות עבור זויות 0 עד 360 בקפיצות של 5, זהו גודל שמצאנו כאפקטיבי ביותר מבחינת איכות התוצאה.

**אורך גאוסיאן** – גודל זה נקבע בהתאם לרזולוציית התמונה. השתמשנו באורך של 100 פיקסלים.

**סטורציה** – הקטנו את הסטורציה של הצבע ב 90% לקבלת תוצאה קרובה ביותר למציאות ובהתאם לנוסחאות [4].

# תוצאות

## השלמת קווים

בתמונת הקלט המוצגת, ישנם קוים צבעוניים בשלושה גוונים שונים (אדום, כחול, צהוב) ב4 רמות סטורציית צבע שונות (100%, 75%, 50%, 25%) בסדר יורד משמאל לימין.

באיור 2 ניתן לראשות שלב אחר שלב את תוצאות הביניים של הליך השלמת הקוים בסופו אנו מקבלים צורות צבעוניות שהן תוצאה של השלמת הקוים: זיהוי קצוות לפי אוריינטציה, ניחושים מושכלים, פעולת סף. הפלט של הליך זה משמש כקלט להליך מילוי הצבע (Filling-in Process).

השלבים המוצגים:

1. תמונת הקלט **(**איור 3 - 1).
2. זיהוי קצוות לפי אוריינטציה בעזרת פילטר גבור (איור 3 – 2).
3. שיגור ניחושים מושכלים – קוים דועכים בכיוון קו-לינארי ואורתוגונלי (איור 3 – 3).
4. סכימת הניחושים המושכלים בכל האוריינטציות (איור 3 – 4).
5. ביצוע פעול סף – שימור תגובות חזקות בלבד (איור 3 – 5).

Diagram

Description automatically generated with medium confidence

איור 3 | תוצאות ביניים של הליך השלמת הקוים (ניחושים מושכלים) כפי שמבוצע באלגוריתם, על בסיס המודל החישובי המוצע.

## מילוי צבע (Filling-in Process)

הקלט של הליך מילוי הצבע הנו הפלט של הליך השלמת הקוים (3.1). באיור 3 ניתן לראות את תוצאות הביניים של תתי השלבים בהליך כפי שמתואר במודל החישובי – זיהוי מקורות חום, מילוי צבע עפ"י נוסחאת פואסון, קבלת תוצאה סופית.

השלבים המוצגים:

1. תמונת הקלט (איור 4 – 1).
2. זיהוי "מקורות חום" (איור 4 – 2).
3. חישוב של פעפוע הצבע לתוך הצורה (איור 4 – 3).
4. הוספת הצבע לצורה בסטורציית צבע מוחלשת (איור 4 – 4).
5. תוצאה סופית (איור 4 – 5).

A picture containing diagram

Description automatically generated

איור 4 | תוצאות ביניים של הליך המילוי (Filling-in Process) כפי שמבוצע באלגוריתם, על בסיס המודל החישובי המוצע.

## תוצאות סופיות

Calendar

Description automatically generated

איור 5 | תוצאות האלגוריתם עבור 2 תמונות קלט שונות.

באיור 5 מוצגות תוצאות עבור 2 תמונות מסונתזות עבורן מבוצע בהצלחה זיהוי תופעת הNCS, והצגה בתמונות הפלט.

# סיכום, מסקנות והצעות להמשך

## סיכום:

בעבודה זו הצגנו מודל חישובי גנרי המתאר תהליך עיבוד אותות במערכת הראייה. בהליך זה נוצרים קווים (contours) מדומים בתמונה הנתפשת כתוצאה מסמיכות של גרדיאנטים בתמונה כרומטית או א-כרומטית, ומשטחים מדומים הנוצרים בעקבות הליך דיפוזיה של צבע מהקווים המדומים. עבור התופעה הראייתית NCS הגרדיאנטים נמצאים בסמוך אחד לשני בצורה כזו שהמודל מזהה ומציג בצורה טובה את המשטחים המדומים כפי שנתפשים בעין האנושית.

ניתן לתאר את המודל המוצע בשני שלבים. השלב הראשון הוא השלמת קוים, שלב שבו ביצענו פיתוח של ההיפותזה והמודל החישובי המוצע במאמר “Single additive mechanism predicts lateral interactions effects –Computational Model” (Matichin et al., 2015). השלב השני הנו הליך מילוי צבע בדיפוזיה ממקור חום, מודל המוצע ב “A compound computational model for Filling-in processes triggered by edges: watercolor illusions.” (Cohen-Duwek, Hadar, and Hedva Spitzer, 2019).

לצורך בדיקת ההיפותזה כתבנו אלגוריתם המנבא את אופן תפישת התמונה לפי המודל החישובי המוצע. האלגוריתם נבדק על אוסף תמונות מסונתזות בהן מופיע בבירור האפקט הראייתי NCS.

## השוואה למודלים קיימים:

המודל החישובי היחיד בספרות שרלוונטי לאילוזיית הNCS הנו מודל הBCS, FCS (Grossberg, S. and E. Mingolla, 1985) המורכב משני חלקים מרכזיים. הראשון BCS ממדל את יצירת הקונטורים החוסמים את הליך הדיפוזיה והשני FCS, הליך דיפוזיה של צבע מקוים צבעוניים הנחסם ע"י הקונטור.

מודל הBCS, FCS ממדל את הליך יצירת המשטח המדומה בשני שלבים, בצורה דומה למודל שלנו. שוני מרכזי בין מודל זה למודל שלנו הוא הליך מילוי הצבע. עפ"י FCS הצבע של המשטח המדומה נוצר כהליך דיפוזיה מקוים צבעוניים הנמצאים בתוך שטח הקונטור המדומה, בניגוד להיפותזה שלנו בה נטען כי הצבע מגיע מהקונטור המדומה. הבעייתיות בהצעה שלהם היא שהיא אינה מסבירה או תואמת את הממצאים במקרים מסוימים באילוזיית water color [4], בעוד שהמודל שלנו מבוסס על דיפוזיה ממקור חום עפ"י נוסחת פואסון המתאים לתופעת הNCS וגם לתופעת ה water color illusion.

מודל נוסף המתאר את הליך המשכת הקוים (הקונטורים המדומים) הוא מודל ה Reentry (Finkel, L. and G. Edelman, 1989). המודל המוצע במאמר זה הנו מודל תיאורטי להליך יצירת קונטורים מדומים מגרדיאנטים בתמונה. הבעיות המרכזיות במאמר זה הן חוסר גיבוי של ההיפותזה בנוסחאות וניסויים מוגבלים. הרעיון המוצע הנו מודל תיאורטי בלבד ללא הסבר מתמטי מספק והניסויים המבוצעים במאמר זה הנם על הופעת קונטורים מדומים בצורת מרובע בלבד, בעוד ההיפותזה שלנו מוגדרת היטב בנוסחאות מתמטיות ומאפשרת גילוי קונטורים מדומים בצורות שונות.

המודלים המוצעים מעלה אינם מלווים באלגוריתם ניבוי וקשה לבחון את נכונות המודל ללא תוצאות ויזואליות.

## מסקנות והצעות:

הניסויים שביצענו על תמונות מסונתזות מאששות את ההיפותזה שלנו.

ביצענו מספר הנחות וקירובים שחשוב להתייחס אליהם ביחס לתוצאות המוצגות בדו"ח זה.

על פי ההיפותזה "הניחושים המושכלים" הנם המשכות קוים בכיוון קו-לינארי ואורתוגונלי ביחס לאוריינטציה של שדה הגרייה. באלגוריתם מימשנו תכונה זו כקווים דועכים בשני הצירים (איור 3 - 3) ושיטה זו מאפשרת קבלה רק של מצולעים, למרות שבמקרים רבים הקונטור המדומה אינו מצולע, כגון העיגולים המוצגים בתוצאות באיור 5. להערכתנו אותם "ניחושים מושכלים" אינם קוים חד-מימדיים אלא מעין שעון חול דועך (“Double Wedge”) בכיוון קו-לינארי וארותוגונלי (איור 6), מה שהיה מאפשר קבלת צורות שאינן מצולעים כגול עיגול.



איור 6 | שעון חול דועך (Double Wedge).

מכיוון שביצענו את הניסויים שלנו על תמונות מסונתזות על רקע לבן בלבד, ישנם הנחות וקירובים שביצענו באלגוריתם שדורשים פיתוח על מנת להתאים לתמונות אמיתיות כגון הפיכת הפרמטרים הסטטיים (4.6) לפרמטרים דינאמיים (תלויים בגודל ורזולוציית התמונה) וזיהוי תופעות בקני מידה שונים בתוך התמונה.

מקורות

**פרסומים באנגלית:**

**מאמרים:**

1. Matichin, Hava, Shmuel Einav, and Hedva Spitzer. "Single additive mechanism predicts lateral interactions effects—computational model." *JOSA A* 32.12 (2015): 2247-2259.‏
2. Pinna, Baingio, and Stephen Grossberg. "The watercolor illusion and neon color spreading: a unified analysis of new cases and neural mechanisms." *JOSA A* 22.10 (2005): 2207-2221.‏
3. Cohen-Duwek, Hadar, and Hedva Spitzer. "A Model for a filling-in process triggered by edges predicts “Conflicting” afterimage effects." *Frontiers in neuroscience* 12 (2018): 559.‏
4. Cohen-Duwek, Hadar, and Hedva Spitzer. "A compound computational model for Filling-in processes triggered by edges: watercolor illusions." *Frontiers in neuroscience* 13 (2019): 225.‏
5. Van Tuijl, H. F. J. M., and Emanuel Laurens Jan Leeuwenberg. "Neon color spreading and structural information measures." *Perception & Psychophysics* 25.4 (1979): 269-284.‏
6. Devinck, Frédéric, et al. "Illusory spreading of watercolor." *Journal of vision* 6.5 (2006): 7-7.‏
7. Bressan, Paola, et al. "Neon color spreading: a review." *Perception* 26.11 (1997): 1353-1366.‏
8. Grossberg, S. and E. Mingolla. “Neural dynamics of form perception: boundary completion, illusory figures, and neon color spreading.” *Psychological review* 92 2 (1985): 173-211 .
9. Finkel, L. and G. Edelman. “Integration of distributed cortical systems by reentry: a computer simulation of interactive functionally segregated visual areas.” *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* (1989).

**ספריות:**

1. Bradski, G. (2000). The OpenCV Library. *Dr. Dobb&#x27;s Journal of Software Tools*.
2. Van der Walt, S., Sch"onberger, Johannes L, Nunez-Iglesias, J., Boulogne, Franccois, Warner, J. D., Yager, N., … Yu, T. (2014). scikit-image: image processing in Python. *PeerJ*, *2*, e453.