

## **ביולוגיה חישובית תרגיל 1 - אוטומט בלוקים**

שמות ות"ז: מיכאל אזאגורי - 209275387, עדי זוהר - 211822259. סטודנטים בתואר ביולוגיה חישובית.

קישור לgithub של התרגיל: [Adi-Zohar/Computational-Biology-Exercise-1: Exercise 1 in Computational Biology course](https://github.com/Adi-Zohar/Computational-Biology-Exercise-1: Exercise 1 in Computational Biology course)

הצהרה: "אנחנו מודעים לדרישת הנוכחות בקורס כפי שפורטו במכתבים ובשיעור הראשון ולכן שמי שלא עומד בדרישה זו לא יוכל לעבור את הקורס".

### **הוראות הפעלה:**

1. להריץ את קובץ main.exe אשר נמצא בגיט.
2. לבחירת הדמיה לשאלה 1 (חוקי האוטומט) -  
הגדרנו דיפולטבית את פורמט המגרש להיות בצורת wraparound עם כמות תאים חיים המאותחלים בצורה רנדומית לפי אחוז שהוגדר מראש, במצב הדיפולטיבי אחוז זה הוגדר 50%.  
ניתן לשנות את כמות התאים החיים בשלב ההתחלה וכן את פעולת המגרש בהיבט של wraparound או לא.
3. לשאלה 2 (gliders)-  
לשאלה זו יש לבחור בתצורת מצב תנאי ההתחלה של "glider1" ולא "random". גם כאן ניתן לבחור בין wraparound או לא.
4. לשאלה 3 -  
לשאלה זו יש לבחור בתצורת מצב תנאי ההתחלה של אחד מה "blinker", "blinker1", "blinker2", "blinker3" ולא "random". גם כאן ניתן לבחור בין wraparound או לא.
5. לחיצה על Exit.

### **חלק א' מימוש והגדרת האוטומט:**

**מטרת התרגיל** – לממש אוטומט תאים מבוסס בלוקים בגודל  $2 \times 2$  על גבי סריג בגודל דיפולטיבי של  $100 \times 100$  הפועל לפי כללים דטרמיניסטיים תלויי בלוק, כאשר ישנה אפשרות לבחור תנאי התחלה שונים עם הסתברויות 0.25, 0.5, 0.75 להופעת יצורים חיים. בנוסף נדרשנו להציג מדדי "יציבות" המאפשרים לעקוב אחר התפתחות המערכת.

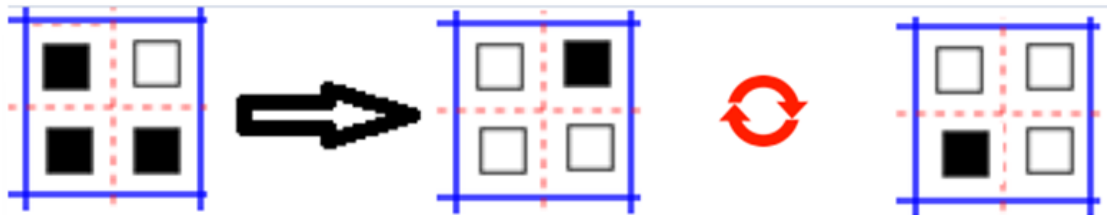
### **תיאור הפעולה של האוטומט -**

- בכל דור מתבצעת חלוקה של הסריג לבלוקים בגודל  $2 \times 2$ : בדורות אי זוגיים (1,3,5,...) נלקחים בלוקים "כחולים", המתחילים מתא (0,0), (0,2), ..., (2,0) וכו'. בדורות זוגיים (2,4,6,...) נלקחים בלוקים "אדומים" שמתחילים בסט מוסט של תאים, כלומר (1,1), (1,3) וכו'.

- כל בלוק מנותח באופן עצמאי לפי מספר היצורים החיים בו – כאשר יצור חי מסומן כשחור ומת כלבן.

חוקי הטרנספורמציה של כל בלוק:

- אם יש **2 יצורים חיים** – הבלוק לא משתנה.
- אם יש **1,0 או 4 יצורים חיים** – הבלוק כולו עובר היפוך ( $0 \leftarrow 1, 1 \leftarrow 0$ ).
- אם יש **3 יצורים חיים** – הבלוק מתהפך ואחר כך עובר סיבוב של  $180^\circ$ , כמו בתמונה:



תנאי שפה -

מימשנו שתי גרסאות של האוטומט:

- **ללא wraparound** - בלוקים חלקיים בקצוות לא משתתפים בחישוב.
- **עם wraparound** - בלוקים נבנים על ידי סגירה מעגלית של הסריג (modulo), כך שאין בלוקים חלקיים.

תנאי התחלה -

בדקנו את התנהגות האוטומט במס' מצבים התחלתיים שונים:

- מצב random -
- מצב בו כל תא מוגדר כחי או מת בצורה רנדומית. במצב זה הייתה לנו חלוקה למס' מצבים, כל תא חי בהסתברות נתונה:

○  $P=0.25$ : מצב דליל יחסית של תאים.

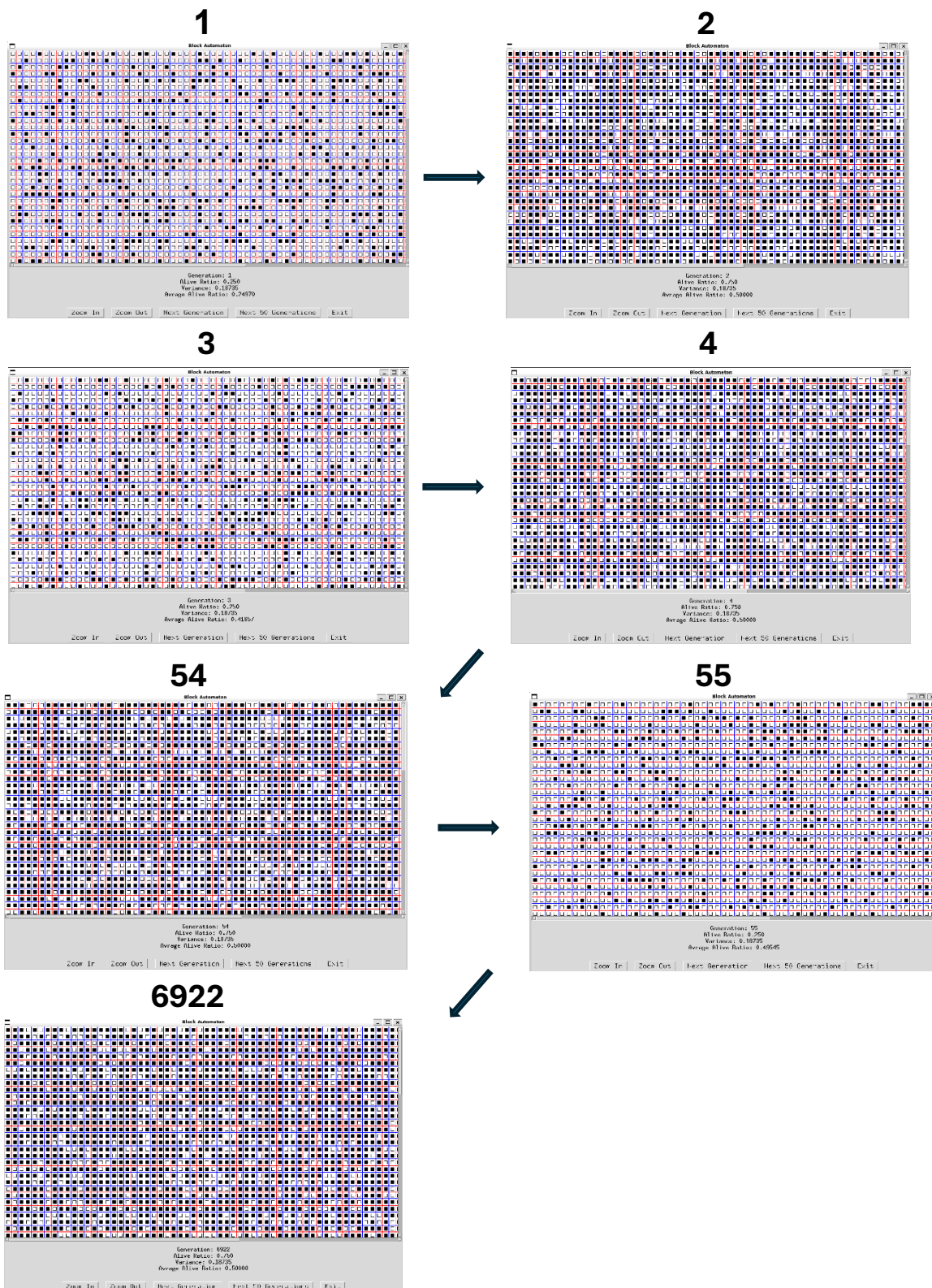
התנהגות - רוב הבלוקים בסריג מכילים 0 או 1 יצורים חיים ולכן בהתאם לחוקי הטרנספורמציה מבוצע היפוך נרחב של הבלוקים בדור הבא.

במצב של wraparound המערכת מבצעת תנועת נדנדה כך שכמות התאים החיים בדור אי זוגי הוא באזור 0.25 ובדור זוגי הוא 0.75 וחוזר לאורך כלל הדורות.

לעומת זאת במצב ללא wraparound, ניתן לראות התכנסות לאורך הדורות לכיוון החצי ולמערכת הדומה למצב התחלתי של  $P=0.5$ .

תובנות - המערכת נוטה לבצע תנועות מחזוריות של מצב התאים החיים, ממוצע אחוז התאים החיים לאורך הדורות מתכנס ל-0.5 והמערכת נוטה לשמור על יציבות.

להלן צילום מסך של התנהגות המערכת בדורות – 1,2,3,4,54,55,6922:



לסיכום – אנו רואים שהמערכת נכנסת למחזוריות דו-דורית – המצב בסריג מתחלף הלך ושוב, כך שכל דור שני כמעט זהה לקודמו. לא נצפית התכנסות לאורך זמן, אך ניכרת מחזוריות ברורה. אין דעיכה אלא שימור של מחזור הפוך-מתמיד. כשמשווים דורות סמוכים (עוקבים) ההתנהגות הכללית נראית כאוטית – אך כשמדלגים דור המערכת מסודרת מחזורית.

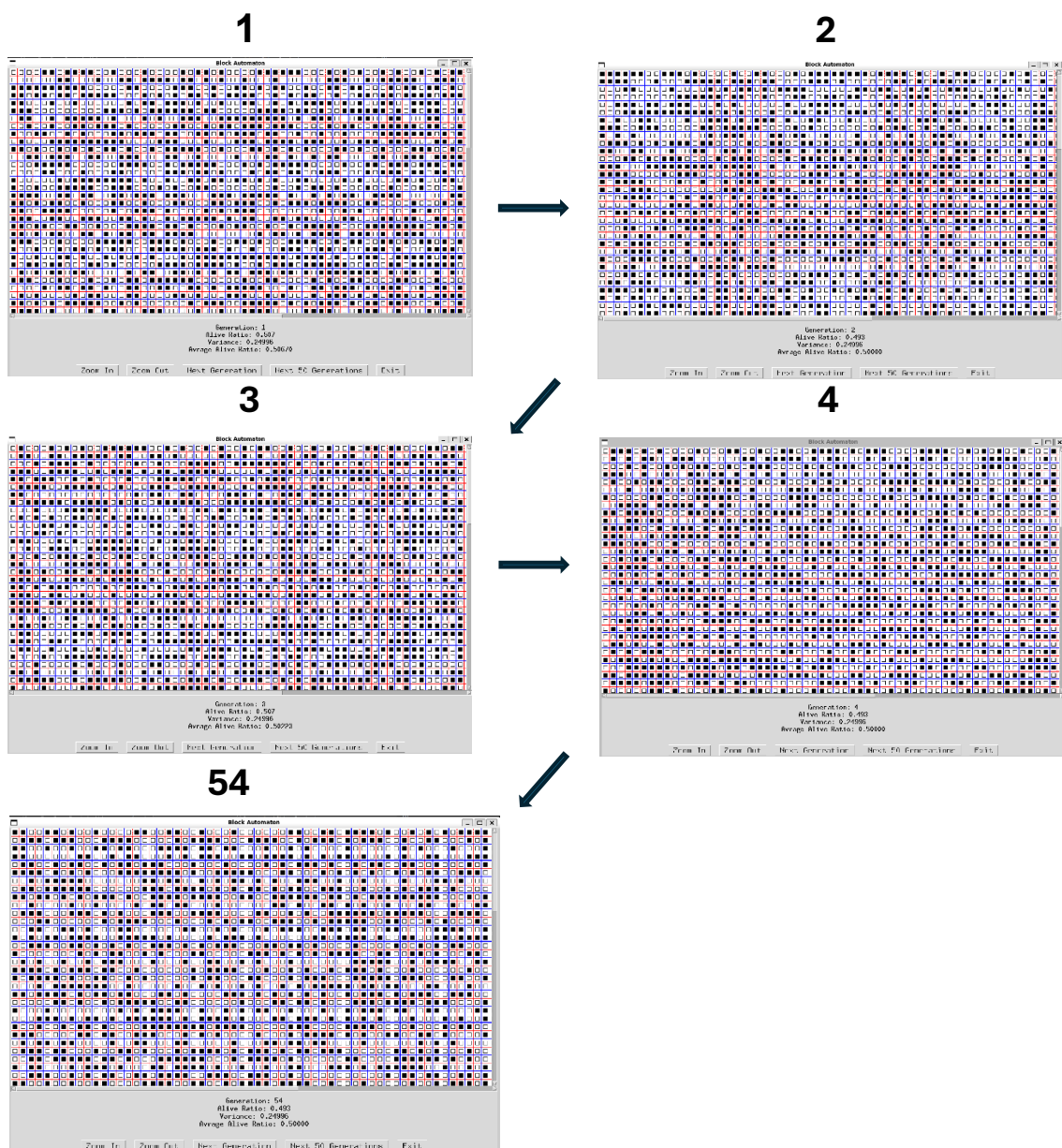
- **P=0.50**: מצב התחלתי מאוזן של תאים – סיכוי שווה ל-0 ו-1.

התנהגות - התפלגות מגוונת בבולקים - מופיעים כל הסוגים של חוקי הטרנספורמציה (לרבות סיבובים).

המערכת שומרת על דינאמיקה "חיה" במשך עשרות רבות של דורות ושומרת על יציבות לאורך הדורות, ניתן לראות שיש השלמה ל-1 בין דור אי זוגי ולזוגי.

תובנות - האוטומט מציג תבניות יציבות אך דינאמיות. קצב שינוי המערכת איטי יחסית והמערכת שומרת על יציבות, יש מחזוריות של אחוז התאים החיים לאורך המערכת כולה, ממוצע אחוז התאים החיים לאורך הדורות מתכנס ל-0.5.

להלן צילום מסך של התנהגות המערכת בדורות – 1,2,3,4,54:



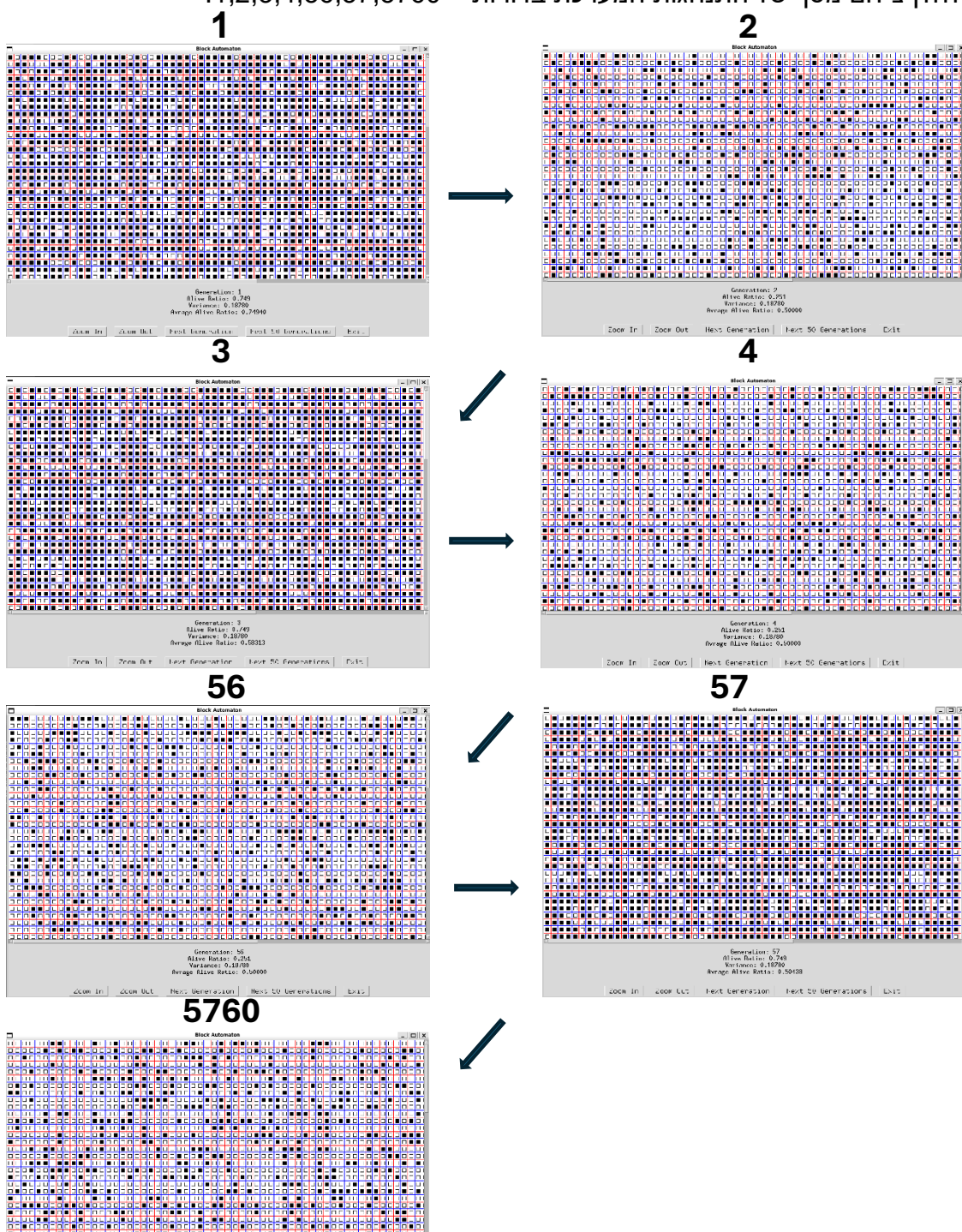
לסיכום – זוהי נקודת איזון מעניינת: ניתן לראות מחזוריות ותבניות מתפתחות לאורך הזמן. המערכת שומרת על יציבות יחסית ונראה כי מדובר בערך סף דינמי שמעודד הופעת מורכבות והתארגנות עצמית.

○  **$P=0.75$** : מצב צפוף – רוב התאים חיים.

התנהגות - כמו ב  $P=0.25$ , גם כאן רבים מהבלוקים עם 3 או 4 תאים ולכן בהתאם לחוקי הטרנספורמציה ישנם סיבובים והיפוכים תכופים.

במצב של wraparound המערכת מבצעת תנועת נדנדה כך שכמות התאים החיים בדור אי זוגי הוא באזור 0.75 ובדור זוגי הוא 0.25 וחוזר לאורך כלל הדורות. לעומת זאת במצב ללא wraparound, ניתן לראות התכנסות לאורך הדורות לכיוון החצי ולמערכת הדומה למצב התחלתי של  $P=0.5$ .

תובנות - המערכת נוטה לבצע תנועות מחזוריות של מצב התאים החיים, ממוצע אחוז התאים החיים לאורך הדורות מתכנס ל 0.5 והמערכת נוטה לשמור על יציבות. להלן צילום מסך של התנהגות המערכת בדורות – 1,2,3,4,56,57,5760:



לסיכום – דומה למצב  $P=0.25$  אך מהכיוון ההפוך – מצב התחלתי עשיר ( $P=0.75$ ) מוביל גם הוא למחזוריות דו-דורית הפוכה, שבה המערכת חוזרת על עצמה כל שני דורות. המופעים הכאוטיים מתאזנים על פני שני דורות לסירוגין, כך שאין מגמה של התייצבות או דעיכה, אך כן מופיעה תבנית מחזורית שמדגישה את תלות הדינמיקה בסוג הבלוקים (כחול/אדום) ובסדר הדורות.

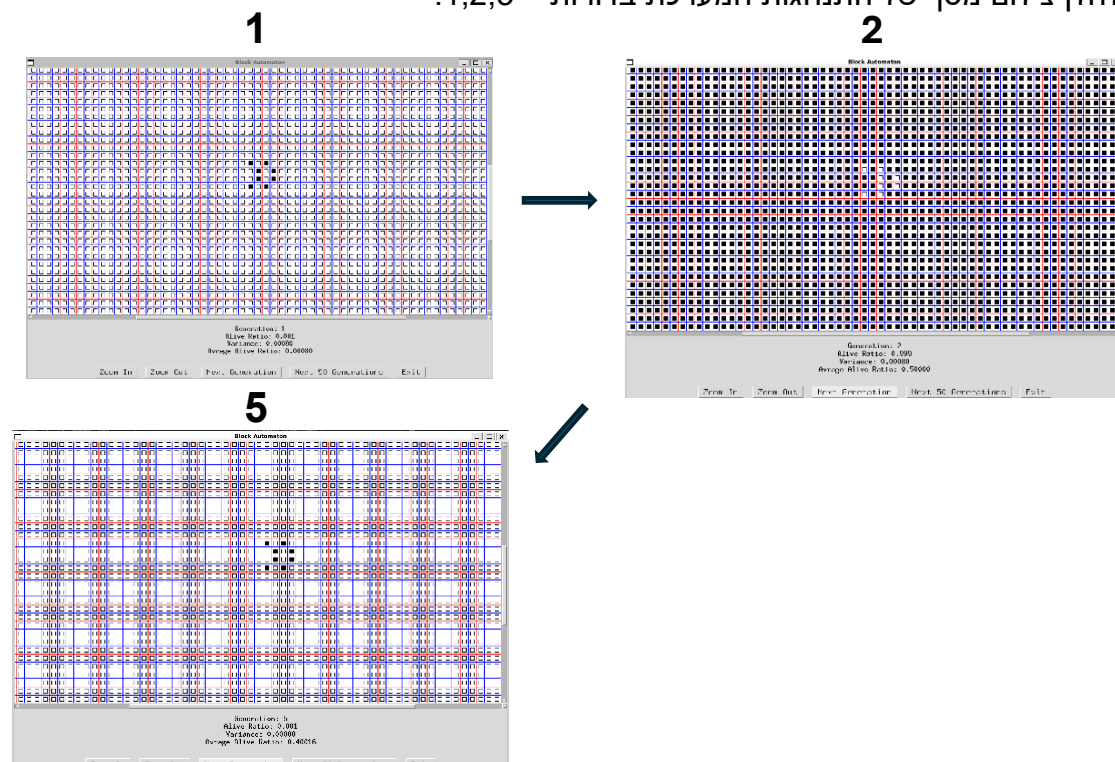
- מצב glider-

מצב בו הגדרנו את התאים מראש בהתאם למצב על מנת להגיע לצורה מסוג גלשן, צורה זאת יודעת "לנוע" במרחב עם הדורות.

היא בעצם מבוססת על צורה סימטרית שבנויה משלושה בלוקים בצורת משולש כך שבלוקים בצדדים בנויים מיצור אחד בבלוק בעוד החוד מורכב מ2 יצורים בבלוק מה שגורם לכך שבצדדים אנחנו רואים המרה לשלוש בעוד בבלוק באמצע אין שינוי. לאחר מכן בדור הבא מצב התאים המתים יוצר צורה הדומה לצורה המקורית, אך זוג התאים באמצע "נע" לצד הרחק מהם. לאחר מכן יש תמונת מראה של התאים המתים רק בתור התאים החיים ולאחר מכן אנחנו רואים שיש תמונת מראה של דור אחד (גם כאן היפוך בין התאים החיים והמתים) ואז חוזר לצורת המקור עם תזוזה של בלוק קדימה (המושג קדימה מתייחס לכיוון שבו זוג התאים הצמודים נמצא, למשל אם התאים המרוחקים נמצאים על אותו X והתאים הצמודים נמצאים ב $X+1$  אזי התנועה היא ימינה).

במצב זה אין הבדל בין wraparound ללא wraparound עד להגעה לקצוות או להגעה של בלוק אחר המשנה את הצורה (למשל נק' אחרת שנמצאת במרחב שהצורה התקדמה אליו).

להלן צילום מסך של התנהגות המערכת בדורות – 1,2,5:





לסיכום – הגליידרים משמרים את תנועתם לאורך הסריג, כל עוד לא נתקלים במחסומים. ניתן לזהות בבירור תבנית תנועה עקבית, המעידה על חוקיות פנימית של המערכת.

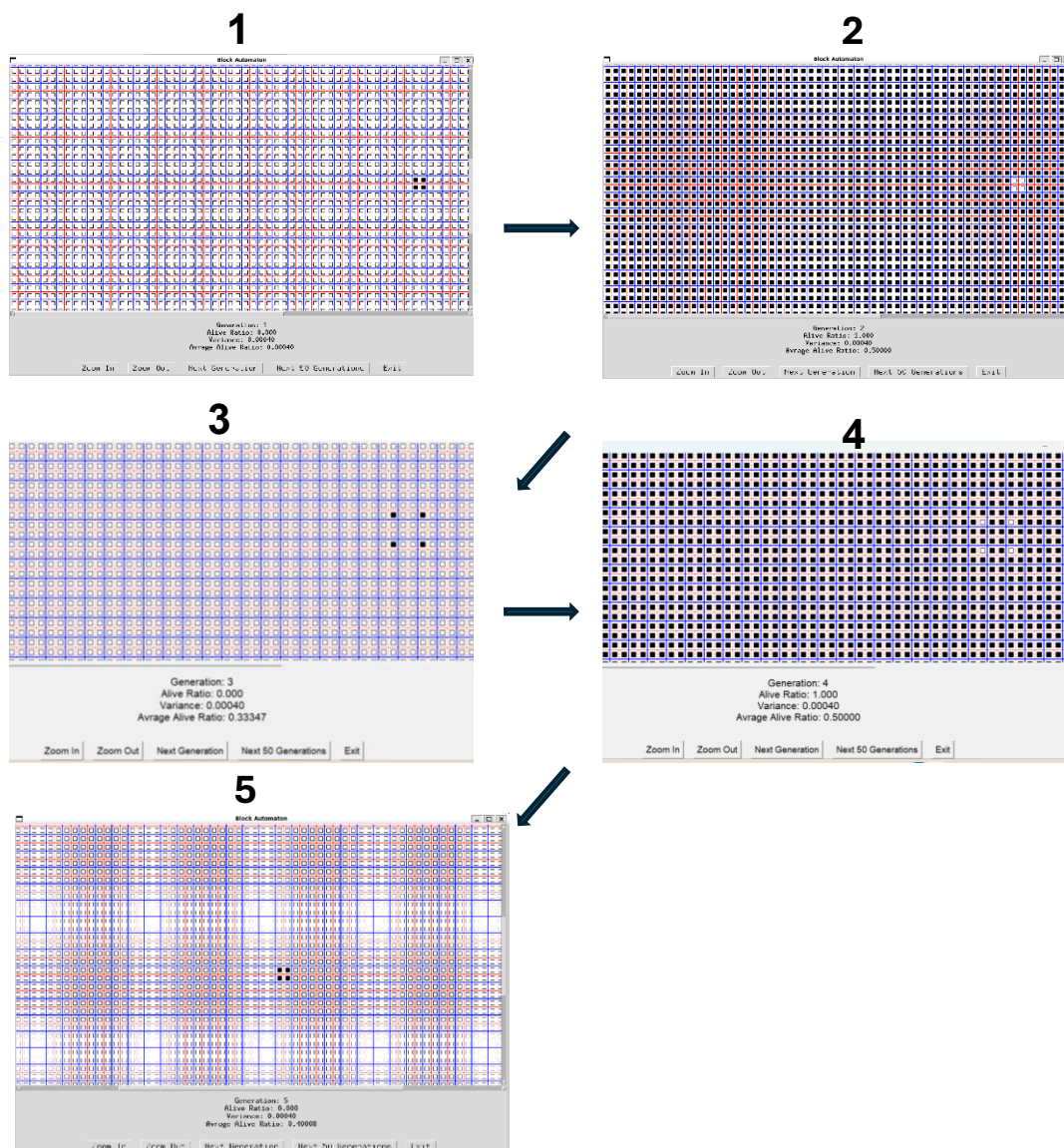
- מצב blinker-

מצב בו הגדרנו את התאים מראש בהתאם למצב על מנת להגיע לצורה שחוזרת על עצמה כל כמה דורות ויוצרת מעין הבהוב.

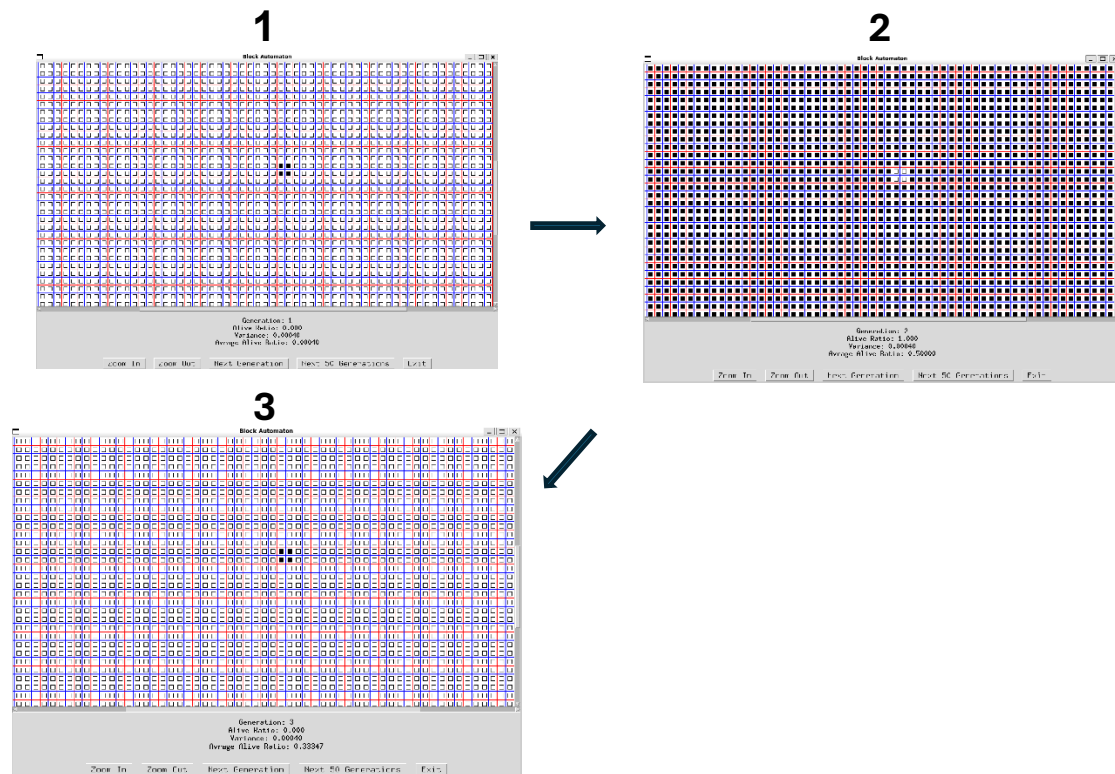
במצב זה אין הבדל בין wraparound ללא wraparound עד להגעה לקצוות או הגעה של בלוק אחר המשנה את הצורה (למשל נק' אחרת שנמצאת במרחב שהצורה התקדמה אליו).

ישנם מס' צורות ואנו הצגנו במערכת 3 כאלה:

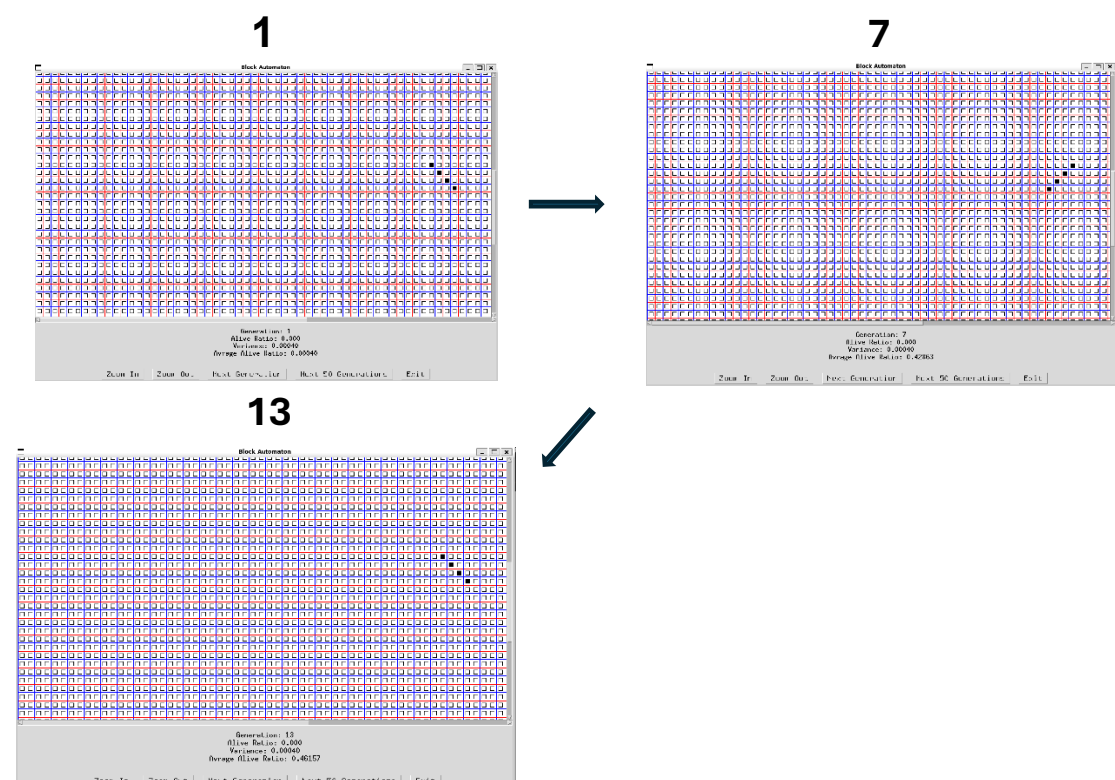
- מצב שמתחיל בריבוע, נפתח וחוזר לעצמו לאחר 4 דורות:



- מצב שמתחיל בריבוע של תאים חיים, הופך למתים וחוזר לחיים בכל 2 דורות הוא חוזר על עצמו ומראה ממש מצב של הבהוב:



- מצב שמתחיל בין אלכסון שנוטה שמאלה, לאחר 6 דורות הופך לאכסון שנוטה ימינה ולאחר עוד 6 דורות הוא חוזר לעצמו:





לסיכום – הדפוס מתנוודד בין שתי צורות קבועות לאורך דורות, ומדד היציבות מדגיש את המחזוריות של שינוי ערכי התאים במיקום קבוע.

#### מדדים כמותיים להתפתחות המערכת -

- יחס תאים חיים - מספר התאים החיים חלקי גודל הסריג:  
כפי שציינו למעלה במצב של wraparound אחוז התאים החיים נשמר לאורך הדורות כשמפרקים את הדורות לדור אי זוגיים ודורות זוגיים, משמע הדורות הזוגיים שומרים על אחוז קבוע והדורות אי זוגיים גם. בנוסף ניתן לראות כי לאורך הדורות ממוצע אחוז התאים החיים מתכנס ל0.5 בכל אחד מהמצבים.  
לעומת זאת במצב של ללא wraparound מצאנו כי לא משנה המצב ההתחלתי של הרשת בסוף נתכנס ל0.5.
- מדד יציבות – מחושב לפי אחוז התאים שלא שינו את ערכם ביחס לדור הקודם מתוך כלל תאי הסריג:  
נשים לב שמדד זה אפשר להעריך את רמת הדינאמיות של המערכת – ערך גבוה מצביע על התייצבות או חזרתיות, עוד שערך נמוך מצביע על שינוי מתמיד או כאוס מקומי.  
ננסה לנתח את הנתונים שחושבו בסימולציה עבור כל דור ונחלק למקרים של כמה תאים חיים היו בבלוק:  
0. כאשר היו 0 תאים חיים כל התאים נהפכו להיות חיים, לכן 0% נשארו אותו דבר.  
1. כאשר היה תא אחד בבלוק כל התאים החיים מתו וכל התאים המתים הפכו לחיים ולכן גם 0% נשארו אותו דבר.  
2. כאשר היה 2 תאים חיים לא היה כלל שינוי ולכן 100% שמרו על מצבם.  
3. כאשר היה 3 תאים חיים אחד נשאר חי ואחד נשאר מת ושניים מתו ולכן 50% שמרו על מצבם.  
4. כאשר היה 4 תאים חיים, כולם מתו ולכן 0% נשארו במצבם.

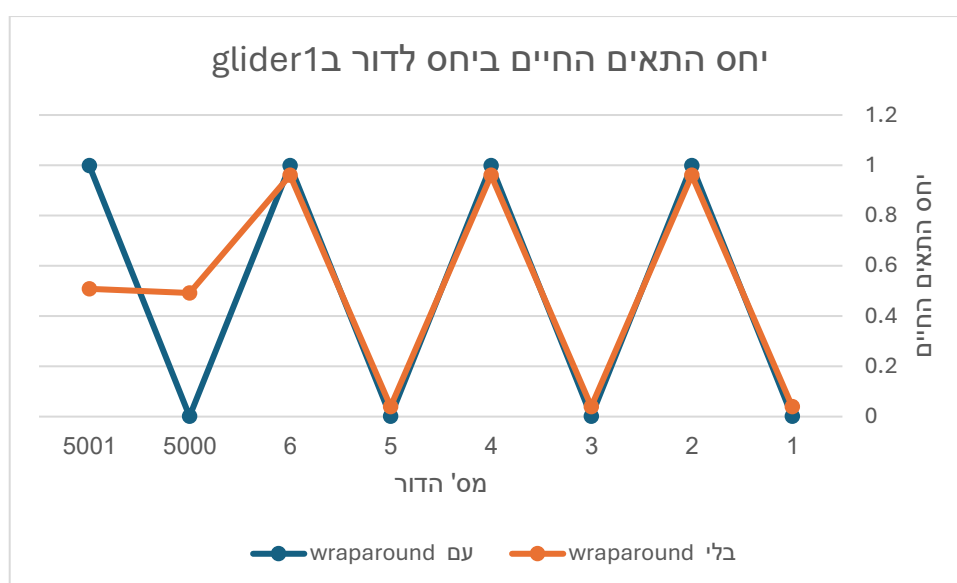
wraparound	מצב התחלתי	דור 1	דור 2	דור 3	דור 4	דור 5	דור 6	דור 5000	דור 5001	ממוצע לאחר 5000 דורות
עם	glider1	0.001	0.999	0.001	0.999	0.001	0.999	0.001	0.999	0.5
	blinker1	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.5
	blinker2	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.5
	blinker3	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.00001	0.99999	0.5
	random 0.5	0.496	0.504	0.496	0.504	0.496	0.504	0.496	0.504	0.5
	random 0.25	0.25	0.75	0.25	0.75	0.25	0.75	0.25	0.75	0.49971
בלי	random 0.75	0.749	0.251	0.749	0.251	0.749	0.251	0.749	0.251	0.50004
	glider1	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.5
	blinker1	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.50091
	blinker2	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.50091
	blinker3	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.04	0.96	0.50091
	random 0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.501	0.498	0.494	0.506	0.5
	random 0.25	0.253	0.747	0.273	0.727	0.282	0.718	0.499	0.504	0.49981
	random 0.75	0.75	0.25	0.732	0.268	0.716	0.284	0.501	0.497	0.50014

## טבלה 1

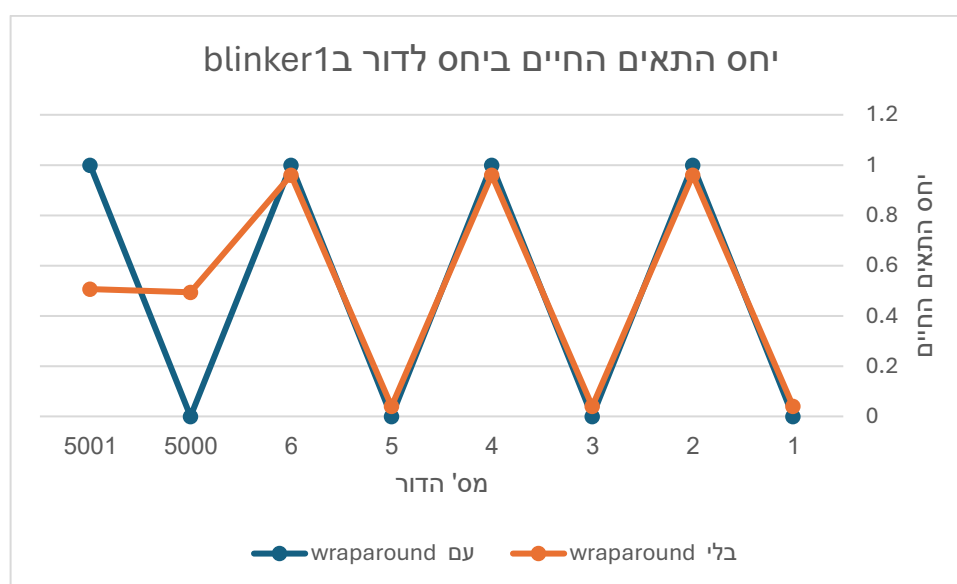
הטבלה מציגה נתונים של מצבים התחלתיים שונים לאורך הדורות, כל תא בטבלה מהווה ממוצע של 10 חזרות.

כפי שציינו קודם בwraparound הדורות חוזרים על עצמם גם לאורך המון זמן, לעומת מצב ללא wraparound שם ניתן לראות שבדור ה-5000 כבר יש התכנסות לכיוון ה-0.5 וזה נשאר באזור 0.5.

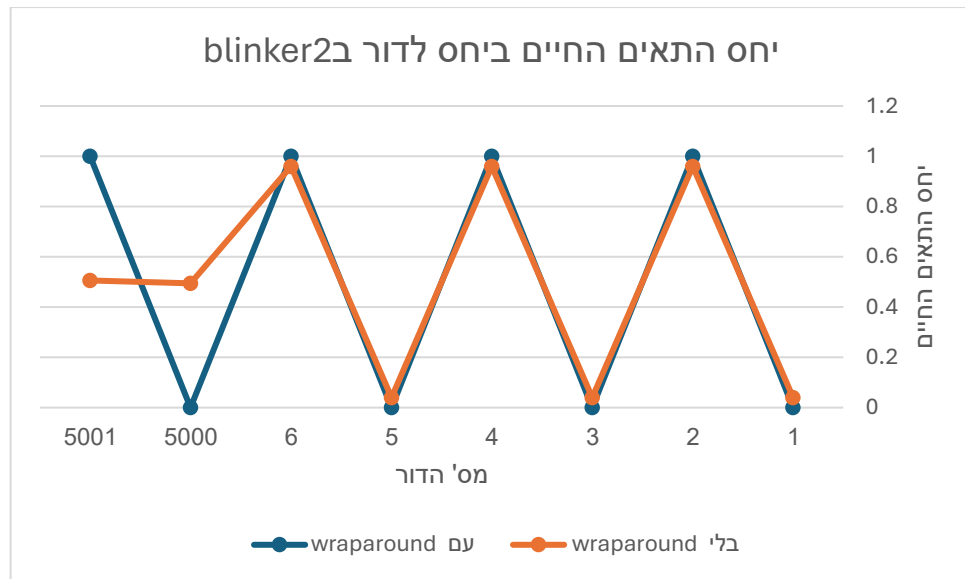
בנוסף ניתן לראות שלא משנה אם אנחנו בwraparound או לא, הממוצע לאחר 5000 דורות הוא באזור 0.5 מה שמראה על כך שאוכלוסיית התאים בהיבט הרחב תמיד שומרת על יציבות סביב החצי.



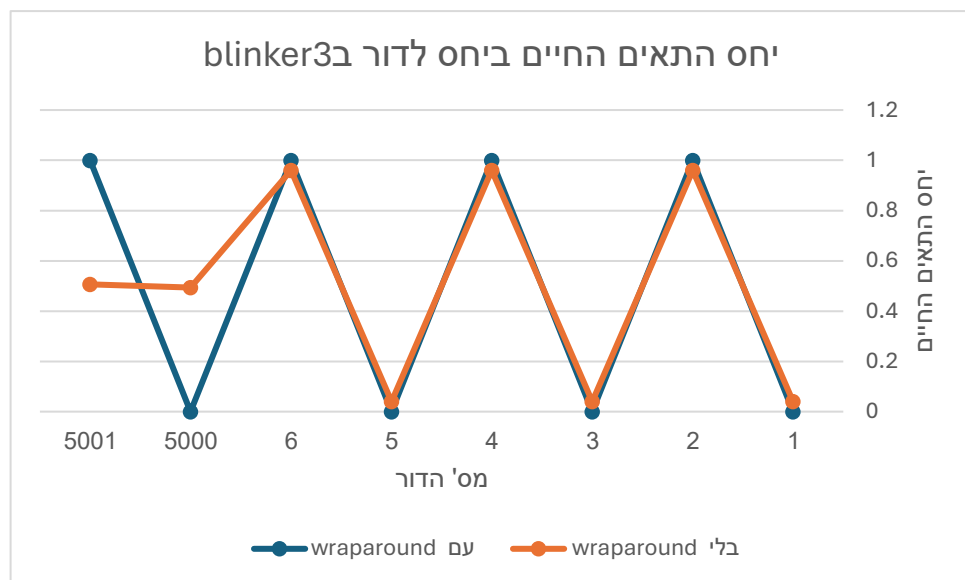
גרף 1: יחס התאים החיים ביחס לדור בglider1.



גרף 2: יחס התאים החיים ביחס לדור בblinker1.

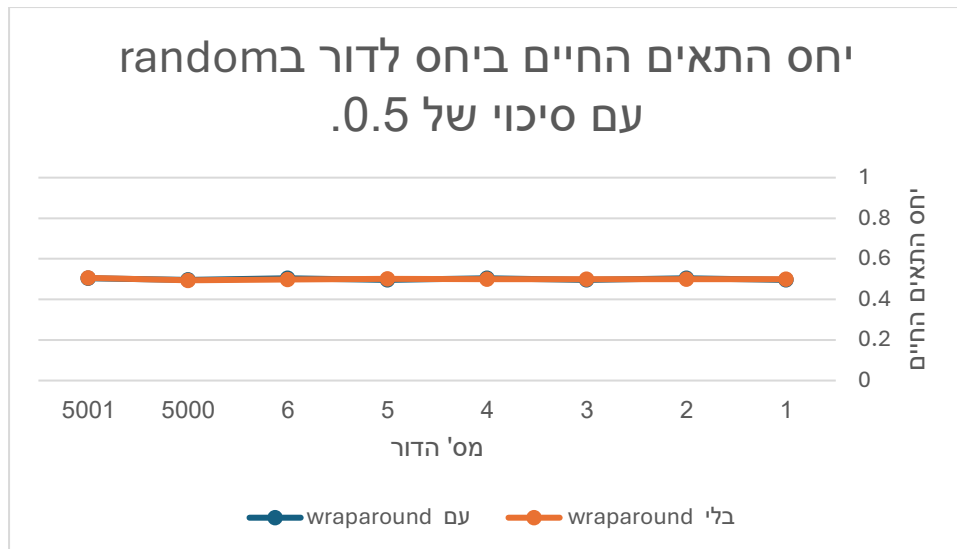


גרף 3: יחס התאים החיים ביחס לדור בblinker2.



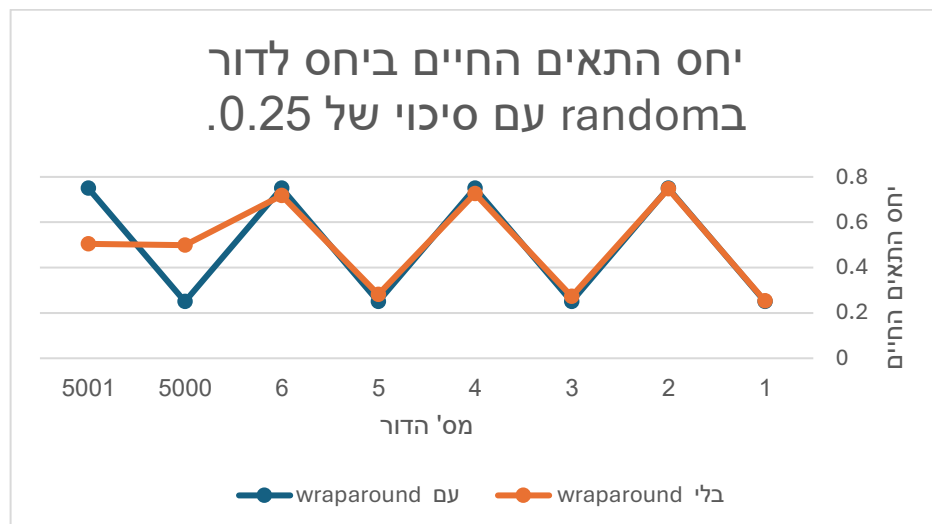
גרף 4: יחס התאים החיים ביחס לדור בblinker3.

כפי שניתן בגרפים 1-4 ישנה תנועה מחזורית ובמצב ללא wraparound יש התכנסות לכיוון החצי.

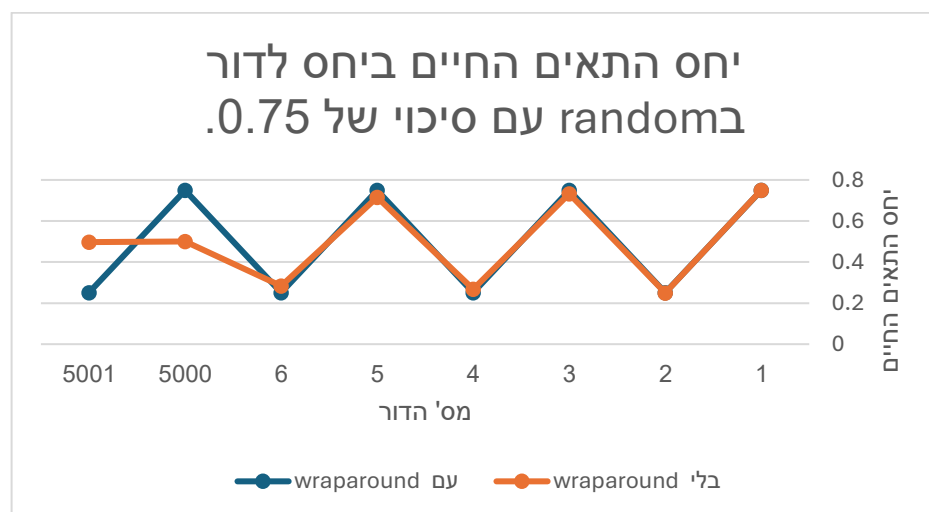


גרף 5: יחס התאים החיים ביחס לדור בrandom עם סיכוי של 0.5.

כפי שניתן לראות בשני המצבים הוא שומר על יחס קבוע של 0.5.

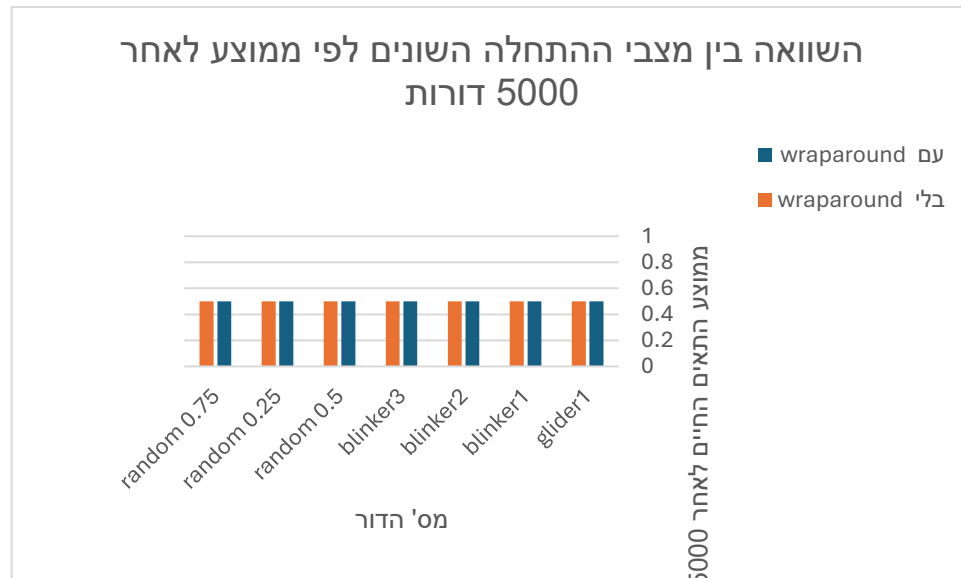


גרף 6: יחס התאים החיים ביחס לדור בrandom עם סיכוי של 0.25.



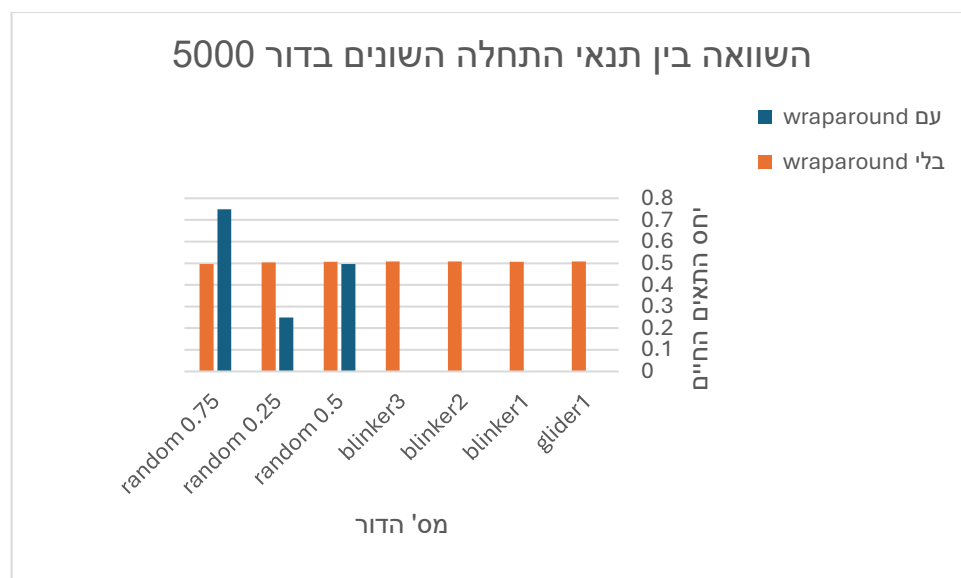
גרף 7: יחס התאים החיים ביחס לדור בrandom עם סיכוי של 0.75.

כפי שניתן לראות גרפים 6 ו 7 מהווים סוג של תמונת ראי אחת של השנייה, שני הגרפים מראים מחזוריות הפוכה בין הדורות, ובשניהם ניתן לראות שבמצב ללא wraparound יש התכנסות ל 0.5.



גרף 8: השוואה בין מצבי ההתחלה השונים לפי ממוצע לאחר 5000 דורות.

גרף 8 מראה לנו כי בשני המצבים הממוצע לאחר 5000 דורות נשמר תמיד סביב 0.5 ללא תלות במצב ההתחלתי.



גרף 9: יחס התאים החיים ביחס לדור 5000 בהשוואה בין מצבי ההתחלה השונים.

גרף 9 נותן לנו תמונת מצב על הדור 5000 וכפי שניתן לראות בעוד אנו מסתכלים על wraparound ניתן לראות כי יש שינויים גדולים בין המצבים ההתחלתיים השונים, במצב ללא wraparound רואים כי כל המצבים ההתחלתיים מתכנסים לחצי כפי שציינו קודם.



לסיכום, תרגיל זה אפשר חקירה עמוקה של מערכת דינמית לא טריוויאלית הנשלטת על ידי חוקים מקומיים פשוטים. ראינו כיצד מצבים התחלתיים משפיעים בצורה מהותית על התנהגות המערכת לאורך זמן, כולל הופעת תבניות, מחזוריות ויציבות. ניסוחים שונים של תנאי שפה wraparound (מול גבולות קשים) משפיעים גם הם על צפיפות האוכלוסייה והקצב בו מתרחשים שינויים. מדדים כמו אחוז תאים חיים ויציבות אפשרו ניתוח כמותי עשיר יותר של הדינמיקה. בכך, התרגיל מדגים היטב את כוחם של מודלים פשוטים ביצירת מורכבות.