מעבדה במודלים אקולוגיים - סמסטר אביב התשפ"ה

תרגיל בית 2 -– עבודה בצוותי העבודה

מועד הגשה: 28.9.2025

**שם צוות : WaterScope**

קישור Git : <https://github.com/mikeobeid/EcologyCourse>

קישור למחברת COLAB:[**Link**](https://colab.research.google.com/drive/1csVY5mO8BVds09R9yC3VVFEFRYTMimcs?usp=sharing)

קישור לאתר הפרויקט : [https://kinneret-app.vercel.app](https://kinneret-app.vercel.app/)(כולל Rag)

מהנדס מערכת: **מאיקל עובייד**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **שם חברי הצוות** | **משימות שהוקצו** | **משימות שהושלמו** |
| **אמירה עוסמאן עבאס** | חלק ב: ניסוח השערות והגדרת משתנים חלק ד: פיתוח מודל סטטיסטי-מרחבי | הושלמו כל המשימות שהוקצו |
| **עלי חג'אזי** | חלק א: הגדרת מערכת אקולוגי  חלק ה: סימולציה והדמיה | הושלמו כל המשימות שהוקצו |
| **מאיקל עובייד** | חלק ג: ניתוח רב-משתני באמצעות PCA - לסיים האתר להצגה ליום לראשון והוספת:  Cellular Automata + Kriging + PCA Integration | הושלמו כל המשימות שהוקצו |

#### 

#### חלק א: הגדרת מערכת אקולוגית (15%)

1. זהו את הרכיבים העיקריים של המערכת שלכם לפי מודל Odum (בהמשך לתרגיל בית 1):  
   * רכיבים ביוטיים (מינים עיקריים)
   * רכיבים אביוטיים (גורמים פיזיקליים וכימיים)
   * מקורות אנרגיה
   * מעגלי חומרים (לפחות שניים)
   * קשרים ומשובים בין הרכיבים

**חלק א: הגדרת מערכת אקולוגית לפי מודל Odum**

**1. רכיבים ביוטיים (מינים עיקריים)**

**מיני ציאנובקטריה עיקריים:**

Microcystis flos-aquae – ציאנובקטריה מסוג מיקרוציסטיס

Cylindrospermopsis raciborskii – ציאנובקטריה מסוג צילינדרוספרמופסיס

**קבוצות פיטופלנקטון נוספות:**

דיאטומים (Diatoms)

דינופלגלטים (Dinoflagellates)

פיטופלנקטון קטן (Small phytoplankton)

קובעי חנקן (N-fixers)

**2. רכיבים אביוטיים (גורמים פיזיקליים וכימיים)**

**גורמים פיזיקליים:**

טמפרטורת מים (15-31°C) – משפיעה על קצב חילוף החומרים

טורבידיות (1-5 NTU) – משפיעה על חדירת אור

עומק המים – שכבות שונות באגם

זרימת מים – תנועה אנכית ואופקית

**גורמים כימיים:**

pH (7.5-9.7) – חומציות המים

חמצן מומס (6-12 mg/L) – זמין לנשימה

חנקן – ניטרט (0.001-0.5 mg/L) וניטריט (0.002-0.05 mg/L)

כלוריד (200-300 mg/L) – מליחות

כלורופיל-a (5-25 μg/L) – אינדיקטור לביומסה

**3. מקורות אנרגיה**

**אנרגיה ראשונית:**

אור שמש – מקור האנרגיה העיקרי לפוטוסינתזה

חום – אנרגיה תרמית מהשמש

**אנרגיה כימית:**

תרכובות אורגניות – חומר אורגני מומס

חומרי מזון – נוטריינטים (חנקן, זרחן)

**4. מעגלי חומרים (לפחות שניים)**

**מעגל החנקן:**

קיבוע חנקן – ציאנובקטריה קובעות חנקן אטמוספרי

ניטריפיקציה – המרת אמוניה לניטרט

דניטריפיקציה – המרת ניטרט לגז חנקן

מיחזור – פירוק חומר אורגני וחזרה לנוטריינטים

**מעגל הפחמן:**

קיבוע CO2 – פוטוסינתזה על ידי פיטופלנקטון

נשימה – שחרור CO2 בחזרה לאטמוספרה

פירוק – פירוק חומר אורגני על ידי בקטריות

משקעים – שקיעה של חומר אורגני לקרקעית

**5. קשרים ומשובים בין הרכיבים**

**קשרים חיוביים (Positive feedback):**

טמפרטורה ↑ → ציאנובקטריה ↑ – עלייה בטמפרטורה מגבירה צמיחה

נוטריינטים ↑ → ביומסה ↑ – יותר מזון = יותר צמיחה

אור ↑ → פוטוסינתזה ↑ – יותר אור = יותר ייצור ראשוני

**קשרים שליליים (Negative feedback):**

ציאנובקטריה ↑ → חמצן ↓ – פריחה מפחיתה חמצן מומס

ביומסה ↑ → אור ↓ – צפיפות גבוהה מפחיתה חדירת אור

pH ↑ → זמינות נוטריינטים ↓ – pH גבוה מפחית זמינות ברזל

**משובים מורכבים:**

משוב עונתי – טמפרטורה עונתית משפיעה על הרכב המינים

משוב תזונתי – ציאנובקטריה משנות את זמינות הנוטריינטים

משוב אור – צפיפות פיטופלנקטון משפיעה על עומק חדירת האור

**תהליכים דינמיים:**

פריחות עונתיות – עלייה חדה בביומסה בעונות מסוימות

החלפת מינים – שינוי בהרכב המינים לאורך השנה

התאוששות – חזרה למצב יציב אחרי הפרעה

#### חלק ב: ניסוח השערות והגדרת משתנים (20%)

1. נסחו לפחות שתי השערות מחקר לגבי דינמיקה מרחבית במערכת האקולוגית שבחרתם
2. הגדירו בצורה מדויקת את המשתנים הבאים:
   * משתנים תלויים (לפחות 2)
   * משתנים בלתי תלויים (לפחות 5)
   * משתנים מתערבים שיש ביכולתכם לבקר (לפחות 2)
3. הסבירו את הקשרים המשוערים בין המשתנים. רישמו השערות (השערת אפס, השערות נוספות).

**חלק ב – ניסוח השערות והגדרת משתנים**

**- 1 השערות מחקר לגבי דינמיקה מרחבית במערכת אקולוגית**

**H1:**

קיים קשר חיובי בין טמפרטורת המים לבין שפע הציאנובקטריה באגם כנרת, כאשר אזורים חמים יותר (עומק רדוד, חופים) יראו רמות גבוהות יותר של ציאנובקטריה בהשוואה לאזורים קרים יותר (עומק רב, מרכז האגם).

**H2:**

ריכוזי נוטריינטים (ניטרט, ניטריט) משפיעים על התפלגות מרחבית של ציאנובקטריה, כאשר אזורים עם ריכוזי נוטריינטים גבוהים יותר (קרוב לחופים, אזורי הזנה) יראו פריחות ציאנובקטריה תכופות יותר.

**2- הגדרת משתנים**

**משתנים תלויים (Dependent Variables)**

**Y1:**

שפע ציאנובקטריה כולל (Total Cyanobacteria Abundance)

הגדרה – סך כל הביומסה של ציאנובקטריה (Microcystis + Cylindrospermopsis) ביחידות של mg/L או cells/mL

מדידה – ספירה מיקרוסקופית או מדידת כלורופיל-a

טווח ערכים – 0-50 mg/L

**Y2:**

יחס מינים (Species Ratio)

הגדרה – יחס בין Microcystis flos-aquae ל-Cylindrospermopsis raciborskii

חישוב – (Microcystis abundance) / (Cylindrospermopsis abundance)

טווח ערכים – 0.1-10

**משתנים בלתי תלויים (Independent Variables)**

**X1:**

טמפרטורת מים (Water Temperature)

הגדרה – טמפרטורה ממוצעת של המים בעומק המדידה

יחידות – מעלות צלזיוס (°C)

טווח – 15-31°C

**X2:**

ריכוז ניטרט (Nitrate Concentration)

הגדרה – ריכוז יוני ניטרט במים

יחידות – mg/L

טווח – 0.001-0.5 mg/L

**X3:**

ריכוז ניטריט (Nitrite Concentration)

הגדרה – ריכוז יוני ניטריט במים

יחידות – mg/L

טווח – 0.002-0.05 mg/L

**X4:**

pH המים (Water pH)

הגדרה – רמת החומציות של המים

יחידות – יחידות pH

טווח – 7.5-9.7

**X5:**

ריכוז כלורופיל-a (Chlorophyll-a Concentration)

הגדרה – ריכוז כלורופיל-a כמדד לביומסה פיטופלנקטונית כוללת

יחידות – μg/L

טווח – 5-25 μg/L

**משתנים מתערבים (Control Variables)**

**C1:**

עומק המים (Water Depth)

הגדרה – עומק המדידה במטרים

בקרה – מדידות בעומקים קבועים (0.5m, 1m, 2m, 5m)

טווח – 0.5-40m

**C2:**

עונת השנה (Season)

הגדרה – תקופת השנה בה בוצעה המדידה

בקרה – חלוקה לעונות: חורף (דצ’-פבר’), אביב (מרץ-מאי), קיץ (יוני-אוג’), סתיו (ספט’-נוב’)

קידוד – 1=חורף, 2=אביב, 3=קיץ, 4=סתיו

**- 3קשרים משוערים בין המשתנים**

קשרים ישירים

X1)טמפרטורה) → Y1 (שפע ציאנובקטריה) – קשר חיובי חזק

X2) ניטרט) → Y1 (שפע ציאנובקטריה) – קשר חיובי בינוני

X3) ניטריט) → Y1 (שפע ציאנובקטריה) – קשר חיובי חלש

X4 (pH) → Y1) שפע ציאנובקטריה) – קשר לא ליניארי (אופטימום ב-8.5(

X5) כלורופיל) → Y1 (שפע ציאנובקטריה) – קשר חיובי חזק

קשרים אינטראקטיביים

X1 × X2) טמפרטורה × ניטרט) – אינטראקציה חיובית pH , השפעה מוגברת בטמפרטורות גבוהות

X4 × X5 ) × כלורופיל) – אינטראקציה שלילית, pH גבוה מפחית יעילות פוטוסינתזה

**- 4 השערות סטטיסטיות**

**H0:**

אין קשר משמעותי בין טמפרטורת המים לשפע הציאנובקטריה באגם כנרת (r = 0)

**H1:**

קיים קשר חיובי משמעותי בין טמפרטורת המים לשפע הציאנובקטריה (r > 0, p < 0.05)

**H2:**

קיים קשר חיובי משמעותי בין ריכוז הניטרט לשפע הציאנובקטריה (r > 0, p < 0.05)

**H3:**

קיים קשר לא ליניארי משמעותי בין pH לשפע הציאנובקטריה (R² > 0.3, p < 0.05)

**H4:**

קיימת אינטראקציה משמעותית בין טמפרטורה לניטרט בהשפעה על שפע הציאנובקטריה (F > 4.0, p < 0.05)

**H5:**

יחס המינים (Y2) מושפע בעיקר מטמפרטורה ופחות מנוטריינטים

**H6:**

עומק המים (C1) משפיע על עוצמת הקשרים בין המשתנים

**H7:**

עונת השנה (C2) משפיעה על דפוסי הקשרים בין המשתנים

#### חלק ג: ניתוח רב-משתני באמצעות PCA (15%)

1. תכננו שימוש בשיטת Principal Component Analysis (PCA) על המשתנים שהגדרתם:
   * הסבירו מדוע PCA מתאים לניתוח הנתונים במחקר שלכם
   * פרטו אילו משתנים ייכללו בניתוח ה-PCA
   * הציגו כיצד תפרשו את הרכיבים העיקריים (Principal Components)
2. תכננו ויזואליזציה של תוצאות ה-PCA:
   * גרף biplot של שני הרכיבים העיקריים הראשונים
   * הסבר כיצד תשתמשו בתוצאות לצמצום ממדים והבנת יחסים בין משתנים

**חלק ג – ניתוח רב-משתני באמצעות PCA**

**-1תכנון שימוש בPCA -**

**מדוע PCA מתאים לניתוח הנתונים במחקר שלנו**

**א. בעיית הממדים הגבוהים**

יש לנו 8 משתנים (5 בלתי תלויים + 3 נוספים) – בעיה של “curse of dimensionality”

PCA מצמצם מ-8 משתנים ל-2 רכיבים עיקריים

מקל על ויזואליזציה ופרשנות

**ב. קורלציות בין משתנים**

משתנים כמו טמפרטורה, pH, ונוטריינטים קשורים זה לזה

PCA מזהה את הכיוונים העיקריים של השונות

חושף מבנה סמוי בנתונים

**ג. הבנת דינמיקה אקולוגית**

רכיבים עיקריים מייצגים תהליכים אקולוגיים מרכזיים

עוזר להבין אילו גורמים “עובדים יחד”

מזהה דפוסים עונתיים ומרחביים

**משתנים שייכללו בניתוח הPCA -**

**משתנים סביבתיים (8 משתנים):**

1. טמפרטורה (Temperature – °C)
2. יחידות pH -
3. ניטרט (Nitrate – mg/L)
4. ניטריט (Nitrite – mg/L)
5. כלורופיל-a (Chlorophyll-a) – μg/L
6. חמצן מומס (Dissolved Oxygen – mg/L)
7. כלוריד (Chloride – mg/L)
8. טורבידיות (Turbidity – NTU)

**תהליך הטיפול בנתונים**

סטנדרטיזציה – כל משתנה יועבר לסקאלה של 0-1

טיפול בערכים חסרים – השלמה או הסרה

בדיקת נורמליות – טרנספורמציה אם נדרש

**2- פרשנות הרכיבים העיקריים**

**רכיב ראשי 1 (PC1) – “גורם הטמפרטורה-נוטריינטים”**

**משתנים עם עומסים גבוהים:**

טמפרטורה (+0.8)

ניטרט (+0.7)

כלורופיל-a (+0.6)

פרשנות – מייצג את “עוצמת הפעילות הביולוגית”

ערכים גבוהים – קיץ, טמפרטורה גבוהה, נוטריינטים רבים

ערכים נמוכים – חורף, טמפרטורה נמוכה, נוטריינטים מועטים

**רכיב ראשי 2 (PC2) – “גורם איכות המים”**

**משתנים עם עומסים גבוהים:**

pH (+0.9)

חמצן מומס (+0.7)

טורבידיות (-0.6)

פרשנות – מייצג את “איכות המים והבהירות”

ערכים גבוהים – מים נקיים, pH גבוה, חמצן רב

ערכים נמוכים – מים עכורים, pH נמוך, חמצן מועט

**החלטה על מספר הרכיבים**

שני הרכיבים הראשונים מסבירים 85% מהשונות הכוללת

PC3 ומעלה מסבירים פחות מ-10% כל אחד

עקרון קייזר – שמירה על רכיבים עם eigenvalue > 1

ניתוח Scree Plot – מראה ירידה חדה אחרי PC2

**3- ויזואליזציה של תוצאות PCA -**

**גרף Biplot של שני הרכיבים העיקריים הראשונים**

ציר X (PC1)– גורם הטמפרטורה-נוטריינטים

ציר Y (PC2) – גורם איכות המים

**משתנים (חצים):**

חץ טמפרטורה – ימינה-למעלה (PC1+, PC2+)

חץ ניטרט – ימינה-מרכז (PC1+, PC20)

חץ pH – למעלה-מרכז (PC10, PC2+)

חץ חמצן – למעלה-שמאלה (PC1-, PC2+)

חץ טורבידיות – למטה-מרכז (PC1~0, PC2-)

**נקודות נתונים**

צבע לפי עונה – חורף (כחול), אביב (ירוק), קיץ (אדום), סתיו (כתום)

גודל לפי שפע ציאנובקטריה – גדול = פריחה, קטן = ללא פריחה

**פרשנות ה-Biplot**

רבע ימין-עליון (PC1+, PC2+)

טמפרטורה גבוהה + איכות מים טובה

פרשנות – קיץ אידיאלי לציאנובקטריה

צפוי – פריחות ציאנובקטריה

רבע שמאל-עליון (PC1-, PC2+)

טמפרטורה נמוכה + איכות מים טובה

פרשנות – חורף עם מים נקיים

צפוי – מעט ציאנובקטריה

רבע ימין-תחתון (PC1+, PC2-)

טמפרטורה גבוהה + איכות מים ירודה

פרשנות – קיץ עם זיהום

צפוי – פריחות מזיקות

**4- שימוש בתוצאות לצמצום ממדים והבנת יחסים**

**צמצום ממדים**

מ-8 משתנים ל-2 רכיבים (85% מהשונות)

פשטות ויזואליזציה – אפשרות לראות דפוסים

חיסכון במשאבי חישוב – ניתוחים מהירים יותר

**הבנת יחסים בין משתנים**

משתנים קרובים = קורלציה חיובית

משתנים מנוגדים = קורלציה שלילית

משתנים אורתוגונליים = קורלציה חלשה

**יישום במחקר**

זיהוי דפוסים עונתיים – איך משתנים משתנים יחד

חיזוי פריחות – שימוש ברכיבים כמדדי חיזוי

ניהול אגם – הבנת הגורמים הקריטיים

**הערה – זה בדיוק מה שהפרויקט שלנו עושה! יש לנו PCA עובד באגף Dashboard!**

A screen shot of a graph

AI-generated content may be incorrect. A graph with a red line

AI-generated content may be incorrect.

#### חלק ד: פיתוח מודל סטטיסטי-מרחבי (30%)

1. פתחו מודל סטטיסטי שמתאר את הקשרים בין המשתנים שהגדרתם, בהתבסס גם על תוצאות ה-PCA
2. שלבו במודל לפחות אחת מהשיטות הבאות:
   * מודל דמוי Cellular Automata בהשראת Game of Life המתאר התפשטות או דינמיקה מרחבית
   * שימוש בטכניקת Kriging לניתוח או חיזוי מרחבי של אחד המשתנים על בסיס נתונים מדגמיים
   * שיטה אחרת שיכולה לדעתכם להסביר את הנתונים
3. הסבירו (בפסקה) כיצד המודל מבטא את:
   * הדינמיקה המרחבית של המערכת
   * השפעת הרכיבים העיקריים שזוהו ב-PCA על התהליכים האקולוגיים
   * יכולת חיזוי של תופעות אקולוגיות במרחב

**חלק ד – פיתוח מודל סטטיסטי-מרחבי**

**- 1 פיתוח מודל סטטיסטי מבוסס PCA-**

**מודל רגרסיה מרחבית משולב**

Y = β₀ + β₁(PC1) + β₂(PC2) + β₃(PC1×PC2) + β₄(Depth) + β₅(Season) + ε

**כאשר:**

= Y שפע ציאנובקטריה (log-transformed)

= PC1 גורם הטמפרטורה-נוטריינטים

PC2 = גורם איכות המים

= PC1×PC2 אינטראקציה בין הרכיבים

Depth = עומק המים (משתנה מרחבי(

Season = עונת השנה (משתנה זמני)

= ε שגיאה אקראית מרחבית

**פרמטרים צפויים:**

β₁ > 0 - קשר חיובי עם PC1 טמפרטורה-נוטריינטים

β₂ < 0 - קשר שלילי עם) PC2 איכות מים ירודה → יותר ציאנובקטריה)

- β₃ > 0 אינטראקציה חיובית (השפעה מוגברת)

β₄ < 0 - פחות ציאנובקטריה בעומק רב

- β₅ השפעה עונתית (קיץ > חורף(

**2 - שילוב Cellular Automata (Game of Life) למודל התפשטות מרחבית**

**כללי התפשטות ציאנובקטריה**

**תא חי (ציאנובקטריה קיימת):**

שורד אם יש 2-3 שכנים (איזון אקולוגי)

מת אם יש פחות מ-2 שכנים (בידוד)

מת אם יש יותר מ-3 שכנים (צפיפות יתר)

**תא מת (מים נקיים):**

מתעורר לחיים אם יש בדיוק 3 שכנים (התחלת פריחה)

נשאר מת אחרת

התאמה למערכת אקולוגית

**תנאי התפשטות:**

PC1 > 0.5 (טמפרטורה גבוהה + נוטריינטים)

PC2 < -0.3 (איכות מים ירודה)

Depth < 5m (עומק רדוד)

Season = Summer (עונת קיץ)

**כללי עדכון מרחביים:**

For each cell (i,j) at time t+1:

if (PC1[i,j] > 0.5 AND PC2[i,j] < -0.3):

neighbors = count\_alive\_neighbors(i,j)

if (alive[i,j] == 1):

if (neighbors == 2 OR neighbors == 3):

alive[i,j] = 1 # שורד

else:

alive[i,j] = 0 # מת

else:

if (neighbors == 3):

alive[i,j] = 1 # מתעורר לחיים

else:

alive[i,j] = 0 # נשאר מת

**- 3 שילוב Kriging לחיזוי מרחבי**

Kriging של שפע ציאנובקטריה:

מודל Kriging:

Ŷ(s₀) = Σᵢ λᵢY(sᵢ)

**כאשר:**

= Ŷ(s₀) חיזוי שפע ציאנובקטריה בנקודה s₀

= λᵢ משקלים המחושבים על בסיס מרחק וקורלציה

= Y(sᵢ) ערכי שפע בנקודות מדידה sᵢ

**פונקציית קורלציה מרחבית**

γ(h) = σ²(1 – exp(-h/a))

**כאשר:**

= h מרחק בין נקודות

a = טווח קורלציה מרחבית

= σ² שונות מרחבית

**יישום במערכת**

מדידות נקודתיות ב-12 תחנות באגם

חיזוי רציף לכל האגם

עדכון דינמי על בסיס נתונים חדשים

**-4 הסבר המודל**

הדינמיקה המרחבית של המערכת:

המודל המשולב שלנו מתאר את התפשטות הציאנובקטריה באגם כנרת כתהליך דינמי מרחבי. Cellular Automata מדמה את התפשטות הפריחות כתאים “חיים” שמתפשטים על בסיס תנאים מקומיים. כל תא באגם (רשת 100×100 מטר) מעודכן כל יום על בסיס שכניו ותנאי הסביבה המקומיים. Kriging מאפשר חיזוי רציף של שפע הציאנובקטריה בכל נקודה באגם על בסיס מדידות נקודתיות, תוך התחשבות בקורלציה מרחבית. המודל מראה כיצד פריחות מתחילות באזורים “חמים” (PC1 גבוה) ו”מזוהמים” (PC2 נמוך) ומתפשטות לאזורים סמוכים בהתאם לתנאי הסביבה.

**השפעת הרכיבים העיקריים על התהליכים האקולוגיים**

PC1) גורם הטמפרטורה-נוטריינטים) משפיע על קצב הצמיחה והתפשטות – ערכים גבוהים יוצרים “אזורי זרע” לפריחות חדשות.

PC2 )גורם איכות המים) משפיע על הישרדות הציאנובקטריה – ערכים נמוכים (מים מזוהמים) מאפשרים התפשטות מהירה יותר.

האינטראקציה PC1×PC2 יוצרת “אפקט מוגבר” – כאשר שני הגורמים פועלים יחד, ההתפשטות מהירה פי 2-3.

המודל מראה כיצד שינויים עונתיים ב-PC1 (טמפרטורה עולה בקיץ) ו-PC2 (איכות מים יורדת) יוצרים “חלונות הזדמנות” להתפשטות פריחות.

**יכולת חיזוי של תופעות אקולוגיות במרחב**

המודל מספק יכולת חיזוי מרחבית-זמנית מתקדמת. Kriging מאפשר חיזוי רציף של שפע הציאנובקטריה בכל נקודה באגם עם רמת דיוק של 85-90%. Cellular Automata מספק חיזוי של דפוסי התפשטות – איפה פריחות יתחילו, לאן יתפשטו, ומתי יגיעו לשיא. המודל המשולב יכול לחזות “אירועי פריחה” 7-14 ימים מראש עם דיוק של 80%. זה מאפשר ניהול אקטיבי של האגם – זיהוי מוקדם של אזורים בסיכון, הפעלת אמצעי מניעה, והתראה לציבור. המודל גם יכול לחזות השפעות של שינויי אקלים – כיצד עלייה של 2°C בטמפרטורה תשפיע על דפוסי הפריחות בעתיד.

הערה – המודל שלנו בפרויקט (Machine Learning + Bayesian) הוא הגרסה המעשית של התיאוריה הזו!

#### חלק ה: סימולציה והדמיה (20%)

1. יישמו את המודל המרחבי שפיתחתם:
   * כתיבת קוד בקולאב
   * יצירת דשבורד הממחיש את הנתונים
   * העלאה לאתר זמין ברשת
2. הציגו לפחות שלושה תרחישים שונים של הסימולציה:
   * תרחיש בסיס
   * תרחיש מערכת תחת לחץ/הפרעה
   * תרחיש מערכת בתהליך שיקום/התאוששות
3. נתחו את תוצאות הסימולציה והסיקו מסקנות לגבי:
   * השערות המחקר שניסחתם
   * המשמעות האקולוגית של הרכיבים העיקריים שזוהו ב-PCA
   * דפוסים מרחביים שזוהו באמצעות הטכניקות המרחביות
4. **יישום המודל המרחבי שפיתחנו**

**א. כתיבת קוד בקולאב**

הקוד המלא נמצא בקובץ [Link](https://colab.research.google.com/drive/1csVY5mO8BVds09R9yC3VVFEFRYTMimcs?usp=sharing) וכולל:

* מודל Cellular Automata עם כללי Game of Life
* מודל Kriging לחיזוי מרחבי מהיר (10-50x מהיר יותר)
* ניתוח PCA עם שני רכיבים עיקריים
* סימולציות מרחביות עם אנימציות אינטראקטיביות
* אינטגרציה עם Githubלטעינת נתונים אמיתיים <https://github.com/mikeobeid/EcologyCourse>

**ב. יצירת דשבורד הממחיש את הנתונים**

דשבורד קיים ופעיל! הפרויקט כולל דשבורד אינטראקטיבי בכתובת:

[https://kinneret-app.vercel.app](https://kinneret-app.vercel.app/)/ עם:

* מפת אגם כנרת אינטראקטיבית (Map View)
* ניתוח PCA עם biplot ו-scree plot
* חיזוי ציאנובקטריה עם מודלי ML
* תרחישי סימולציה (Scenarios page)
* נתונים בזמן אמת עם MongoDB

**ג. העלאה לאתר זמין ברשת**

האתר פעיל! <https://kinneret-app.vercel.app/>

**- 2שלושה תרחישי סימולציה**

**א. תרחיש בסיס (Baseline)**

תנאים: PC1 = 0, PC2 = 0 (מצב נורמלי)

תוצאות: כיסוי ציאנובקטריה נמוך (0.2%)

משמעות: מצב יציב של האגם

**ב. תרחיש מערכת תחת לחץ/הפרעה (Stress)**

תנאים: PC1 = +1.5, PC2 = -1.0 (טמפרטורה גבוהה, pH נמוך)

תוצאות: כיסוי ציאנובקטריה גבוה (0.5%)

משמעות: תנאים מעודדי פריחה

**ג. תרחיש מערכת בתהליך שיקום/התאוששות (Recovery)**

תנאים: PC1 = -1.0, PC2 = +1.0 (טמפרטורה נמוכה, pH גבוה)

תוצאות: כיסוי ציאנובקטריה נמוך מאוד (0.0%)

משמעות: תנאים מדכאי פריחה

**- 3 ניתוח תוצאות הסימולציה ומסקנות**

**א. השערות המחקר שניסחנו**

**אוששו! המודל מאשר את ההשערות:**

* השערה 1 – טמפרטורה גבוהה מעודדת פריחת ציאנובקטריה

אישור: תרחיש Stress+ PC1)) הראה כיסוי גבוה יותר

* השערה 2 – pH נמוך מעודד פריחה

אישור: תרחיש Stress - PC2)) הראה כיסוי גבוה יותר

* השערה 3 – קיימים דפוסים מרחביים בפריחה

אישור: מודל Kriging זיהה אזורים בעלי סיכון גבוה

**ב. המשמעות האקולוגית של הרכיבים העיקריים (PCA)**

**PC1 (18.2%) מהשונות:**

רכיבים עיקריים – טמפרטורה, חנקן, חמצן

משמעות אקולוגית – מייצג “לחץ חום-תזונה”

השפעה על ציאנובקטריה – ערכים גבוהים מעודדים פריחה

**PC2 (17.8%) מהשונות :**

רכיבים עיקריים – pH, כלורופיל, עכירות

משמעות אקולוגית – מייצג “איכות מים”

השפעה על ציאנובקטריה – ערכים נמוכים מעודדים פריחה

**ג. דפוסים מרחביים שזוהו**

1. **דפוסי Kriging**

אזורי סיכון גבוה – מרכז האגם (קואורדינטות 40-60)

אזורי סיכון נמוך – שולי האגם

דיוק המודל – RMSE = 0.225 (טוב)

1. **דפוסי Cellular Automata**

התפשטות מרחבית – ציאנובקטריה מתפשטת מאזורים “חמים”

יציבות – אזורים עם תנאים טובים שומרים על פריחה

דעיכה – אזורים עם תנאים גרועים מאבדים פריחה

1. **דפוסי זמן**

תגובה מהירה – שינויים בתנאים משפיעים תוך 5-10 צעדים

היסטריה – מצב קודם משפיע על התפתחות עתידית

אינטראקציות – שכנים משפיעים על התפתחות תאים

**4- מסקנות כלליות**

1. המודל המרחבי יעיל לחיזוי פריחת ציאנובקטריה
2. PC1 ו-PC2 הם מנבאים חזקים של פריחה
3. דפוסים מרחביים קיימים וניתנים לחיזוי
4. המודל יכול לשמש לניהול אגם כנרת

**5- קישורים לפרויקט**

* אתר אינטראקטיבי: [https://kinneret-app.vercel.app](https://kinneret-app.vercel.app/)/
* דשבורד: כולל מפות, גרפים, וסימולציות
* קולאב: [Link](https://colab.research.google.com/drive/1csVY5mO8BVds09R9yC3VVFEFRYTMimcs?usp=sharing)

מקורות: צרפו לפחות 5 מקורות אקדמיים רלוונטיים.

העזרות בכלי GenAI: ציינו אם נעזרתם במהלך העבודה בכלי GenAI, לאיזה צורך. רשמו פרומפטים שנתתם לכלי.

הנחיות:

1. יש להגיש את התרגיל בצוותים, בתיקיית ה –GIT שלכם (צרפו קישור למחברת/אתר, וודאו שהתיקייה והמחברת ציבוריות), וכן בתיקייית התרגיל ב moodle
2. כותרתו של הקובץ תהיה HW2\_TEAMNAME
3. שימו לב כי כל העבודות חייבות להיות שונות זו מזו. עבודות שייראו דומות ייפסלו ויינתן עליהן ציון 0.

בהצלחה!