



# **תבניות או לא להיות: על סימטריה ותבניות בעולם הטבע**

מרצה: פרופ' אהוד מירון, אוניברסיטת בן-גוריון

[www.bgu.ac.il/~ehud](http://www.bgu.ac.il/~ehud)

**Think & drink Different**

24 בינואר 2016

**Kuli Alma**

## תבניות מסודרות בטבע היא תופעה נפוצה



← תבניות עננים

תבנית של דיונות ברחן



על הפיזיקה של הגלונים מאת חזי יצחק



מדבר דאנאקיל בצפון מזרח אתיופיה

## תבניות אבנים

Pattern formation in Nature - youtube



אלסקה. גם באי שפיצברגן בנורווגיה

Pattern formation in Nature - youtube

התפתלות נהרות

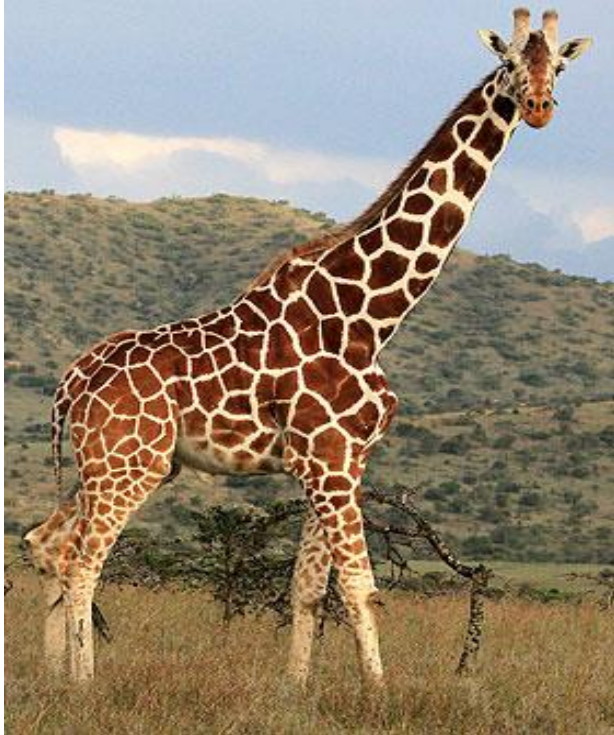


# אלן טיורינג - מאמר על מורפוג'נסיס מ-1952

## אי יציבות טיורינג

# תבניות בבעלי חיים

J.D. Murray, How the Leopard Gets Its Spots, Scientific American 1988



# תבניות במיקרו-אורגניזמים כמו חיידקים ואמבות

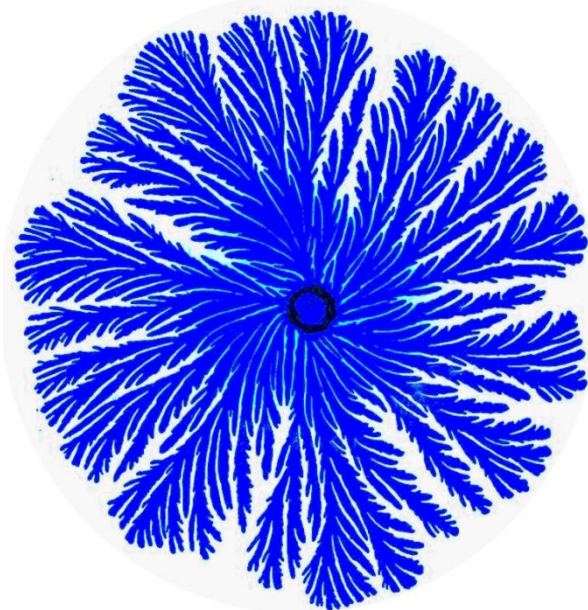
חיידק האנבאנה (*Anabaena*) – סוג של  
ציאנובקטריה חוטית (גודל תא  $\sim 5\mu m$ )

כשיש מחסור בחנקן מופיעים תאים גדולים יותר,  
במרחקים קבועים, שמתמחים בקליטת חנקן  
מהסביבה



תרבית של *P. dendritiformis* bacteria →

↓ ההסתעפות היא תוצאה של  
מגבלת מזון (קוטר  $\sim 6cm$ )



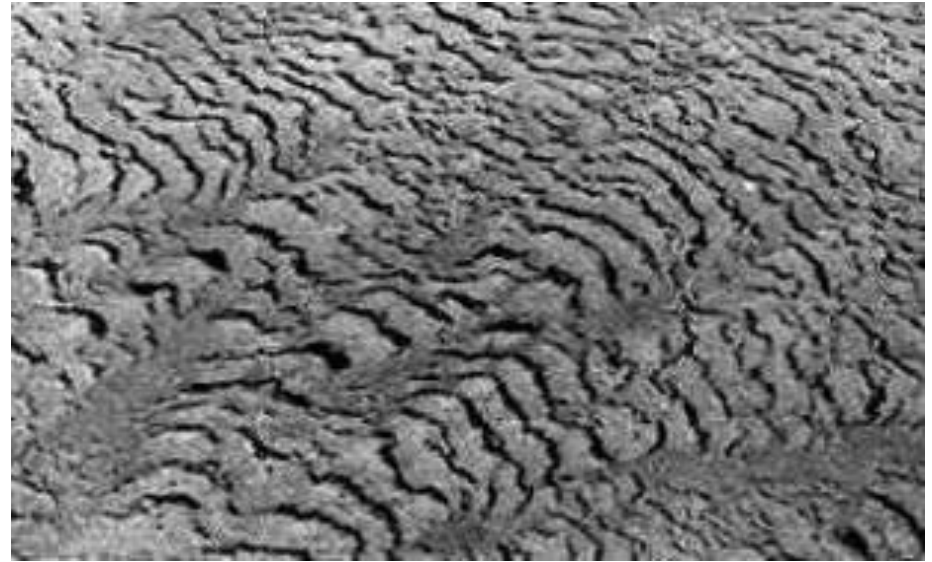
התקבצות של אמבות מסוג  
*Dictyostelium discoideum*  
בצורת גלי ספירלה בתגובה  
למחסור במזון (אורך גל –  
עשירות המילימטר).



תבניות נוצרות כתוצאה  
ממגבלת משאב

פרופ' אשל בן יעקב (1952-2015)

## תבניות צמחיה באזורים מוגבלי מים



פסי צמחיה בניצב לכיוון השיפוע - "טייגר בוש"



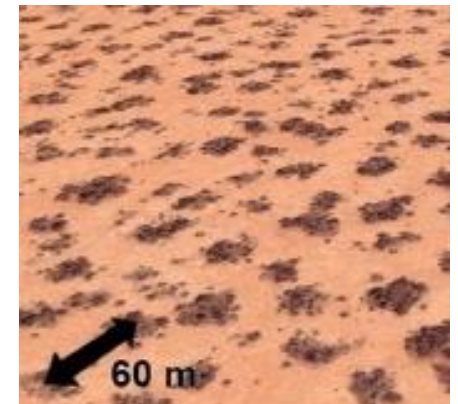
- חידה עם הרבה מיתוסים:
- עקבות רגליהם של האלים
  - דרקון שחי במעמקי האדמה ונשימתו הארסית מחסלת את הצמחייה

"עיגולי פיות" של קרקע חשופה במרבד דשא



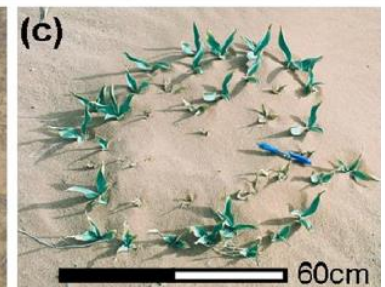
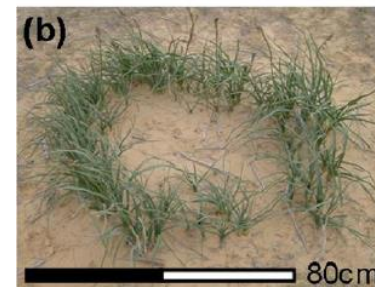
תבנית מבוך של שיחים

תבנית נקודות של שיחים



תבנית מבוך של דשא בגני עומר ←

# טבעות וסהרוני צמחיה



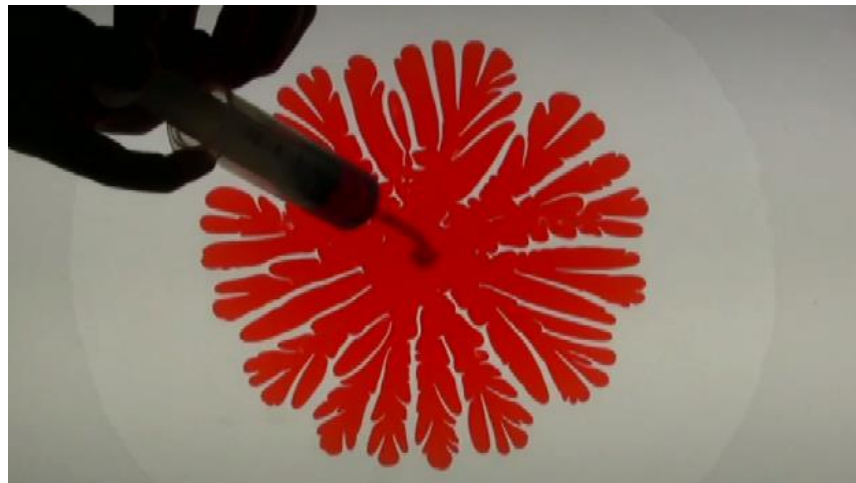
לא לכל התבניות יש הסברים מלאים או מוסכמים, אבל ישנה הסכמה לגבי מספר תכונות בסיסיות:

תבניות נוצרות בדרך של ארגון עצמי בתהליך המכונה אי יציבות (instability), שבו מצב הומוגני מתפתח למצב עם מחזוריות מרחבית. זוהי תופעה של שבירת סימטריה.



כדורי מתכת על פני משטח אופקי מתנוודד: המערכת והנדנוד שלה אחידים במרחב אבל התפלגות כדורים אחידה אינה מצב יציב – המערכת מתפתחת למצב תבניתי לא אחיד

מצב המערכת שובר את הסימטריה של המערכת להעתקות



דחיקת חומר נוזלי אחד על ידי חומר נוזלי אחר עם צמיגות קטנה יותר :

המערכת אחידה ואיזוטרופית (אי תלות בכיוון) אבל קו גבול מעגלי בין שני הנוזלים אינו יציב – המערכת מייצרת קו גבול מסועף, בדומה לתרבויות חיידקים.

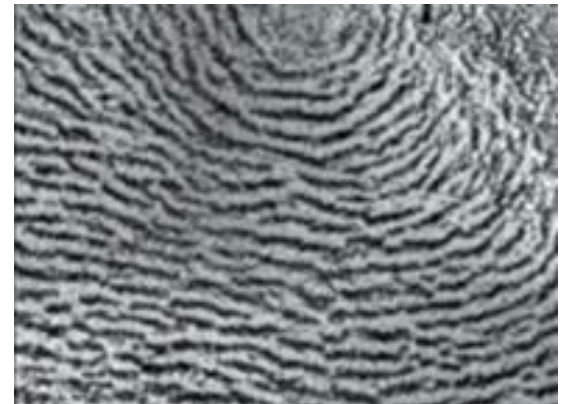
מצב המערכת שובר את הסימטריה הזוויתית

# אוניברסליות – אותן תבניות מופיעות שוב ושוב במערכות שונות

תבניות נקודות



תבניות פסים



הסיבה – התבניות נוצרות כתוצאה מאי-יציבות של מצב אחיד וכל אי-יציבות מתאפיינת בתבנית משלה. מכאן, מערכות שונות שעוברות את אותה האי-יציבות יראו אותן תבניות

עוד על אי-יציבויות בהמשך

## תכונה נובעת - Emergent property

המערכות שאנחנו מדברים עליהן מכילות מספר גדול מאד של מרכיבים:

חומר נוזלי שמכיל  $10^{23} = 100,000,000,000,000,000,000,000$  פרודות (מוליקולות)  
דיונת חול שמכילה  $10^{13}$  גרגרים  
תרבית שמכילה מיליארד חיידקים

הגישה הרדוקציוניסטית אומרת שכדי להבין את ההתנהגות של מערכות כאלו מספיק להבין את החוקים הבסיסיים של מרכיבי המערכת. גישה זאת אינה מביאה בחשבון שיותר יכול להיות שונה ולא רק יותר מאותו הדבר – שבמערכות גדולות יכולות להופיע איכויות חדשות.

דוגמא: שינוי מצב צבירה מנוזל לגז – תכונה שאין לה כל משמעות ברמת הפרודה.

דוגמא אחרת לתכונה נובעת: **הופעת תבניות בדרך של ארגון עצמי** – התנהגות איכותית חדשה שיכולה להופיע כשמספר מרכיבי המערכת מספיק גדול.

מאמר של פיל אנדרסון (חתן פרס נובל בפיסיקה):

**More is different**, Science 177, 393 (1972)

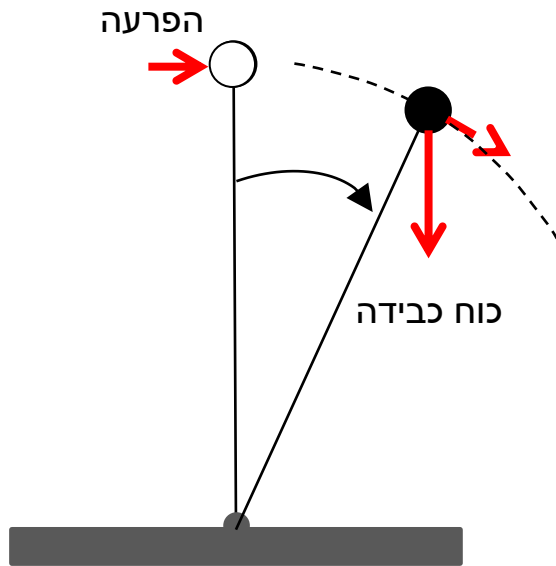
“The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe”.

**המחקר המדעי צריך להתנהל ברמות (סקלות גודל) שונות במקביל**



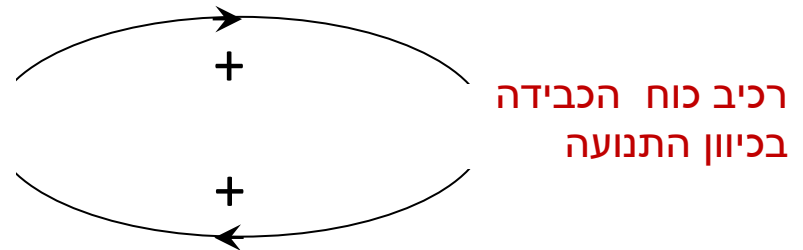
## מושג מפתח בהבנה של תבניות של מושג האי יציבות

מוט אנך שבקצהו כדור אינו יציב כי קיימות הפרעות שגדלות עם הזמן.

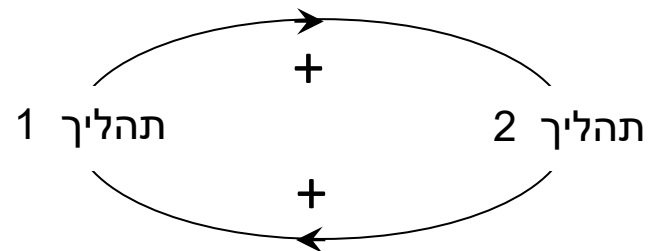
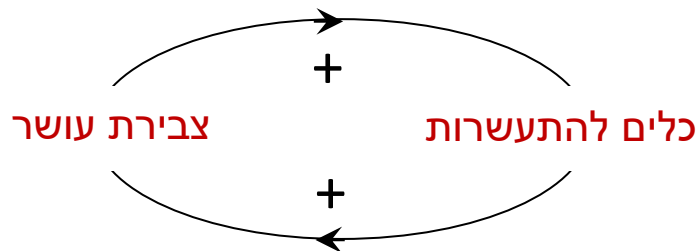


ההפרעות גדלות בגלל משוב חיובי:

הסטייה  
הזוויתית מהאנך



משובים חיוביים גורמים למצבי מערכת לאבד את יציבותם ולייצר אי יציבויות



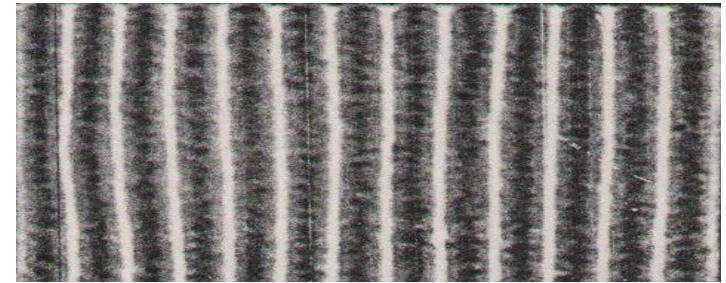
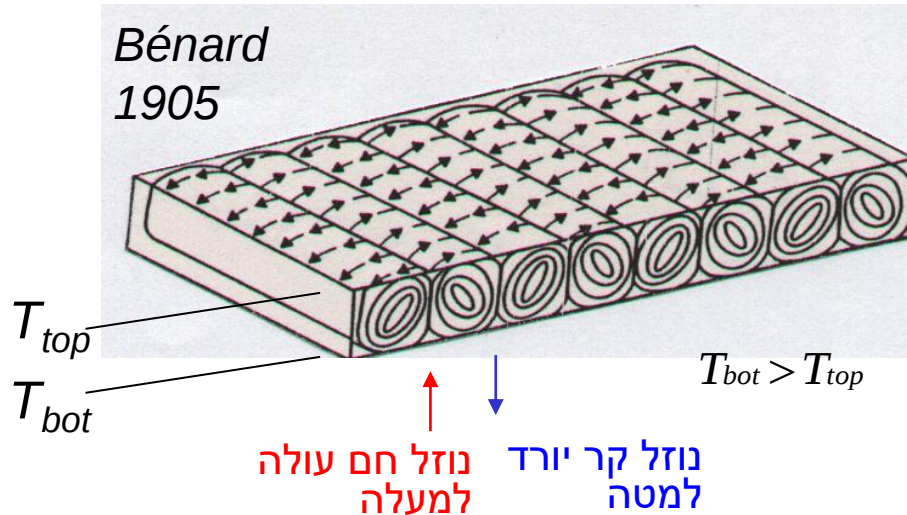
תומא פיקטי מחבר הספר "הון במאה ה-21":

הקצב שבו ההון צומח גבוה יותר מהקצב שבו המשכורות וכל יתר הכלכלה צומחים, ויותר מכך - ככל שאדם או גוף הוא עשיר יותר הוא משיג תשואה גבוהה יותר כי עומדים לרשותו כלים טובים יותר.

הכלכלה המערבית מכילה אי-יציבות מובנית שיוצרת ומגדילה את האי-שוויון בהכנסות

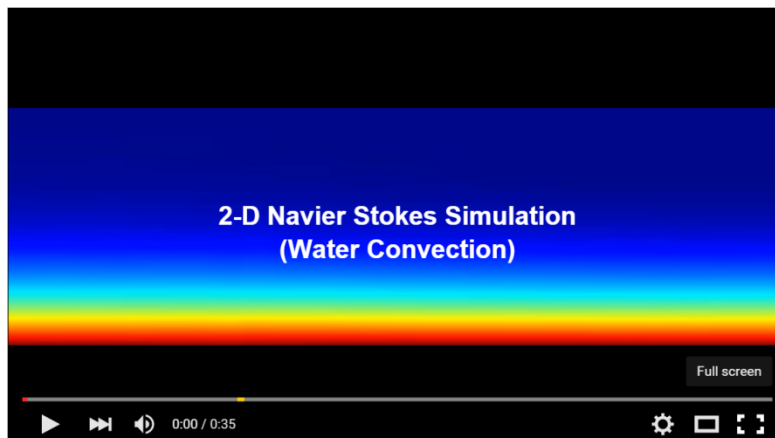
## אי-יציבויות שמולידות תבניות מרחביות

דוגמא 1: מערכת ריילי בנרד שבה מחממים בצורה אחידה שכבת נוזל מלמטה



ויזואליזציה באמצעות הקרנת אור דרך השכבה – הנוזל הקר מרכז אור

כשמחממים נוזל הוא מתפשט ונעשה קל יותר. הנוזל שלמטה רוצה לעלות וזה שלמעלה לרדת. יכול להתרחש רק אם יש שבירת סימטריה: מקומות של נוזל חם שעולה ומקומות אחרים של נוזל קר שיורד.



מצב המנוחה של הנוזל מאבד יציבות כשהפרש הטמפ' עובר ערך סף ומתפתח למצב חדש בו הנוזל מתארגן בעצמו בתבנית גלילי הסעה מקבילים – אשר יוצרים תבנית פסים.

הדגמה בעזרת פתרון של משוואות  
הזרימה של הנוזל ←

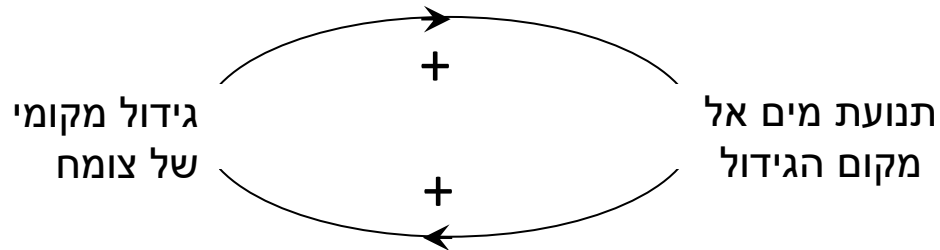
מהו המשוב החיובי שאחראי להופעה של אי יציבות זאת?



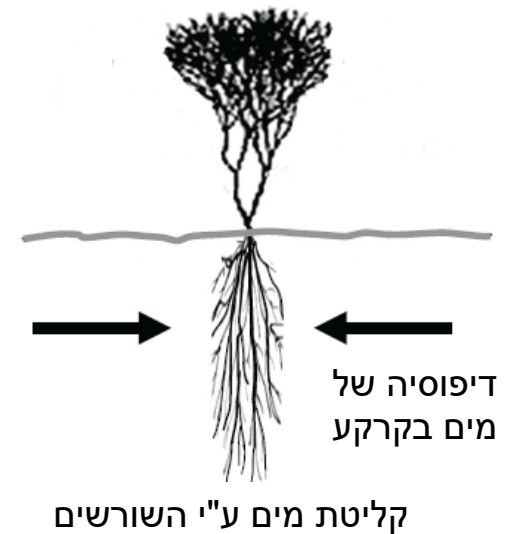
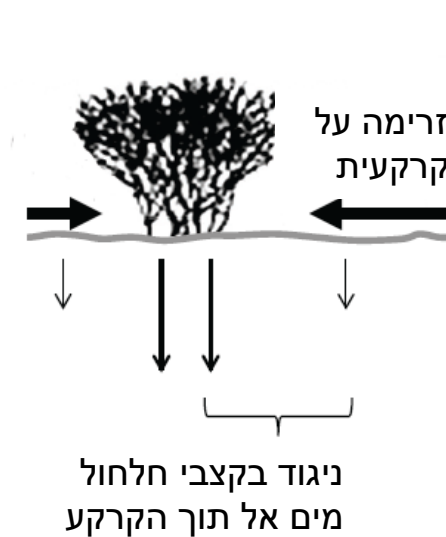
כאשר הנוזל הוא אוויר חם ולח, לדוגמא סמוך לקרקע בקרבת ים, עלית האוויר כלפי מעלה לשכבה קרה יותר יכולה להיות מלווה בהתעבות אדי המים לטיפות ויצירת עננים בהתאם לתבנית הזרימה

## דוגמא 2: כתמיות צמחיה באזורים מוגבלי מים

המשוב החיובי:

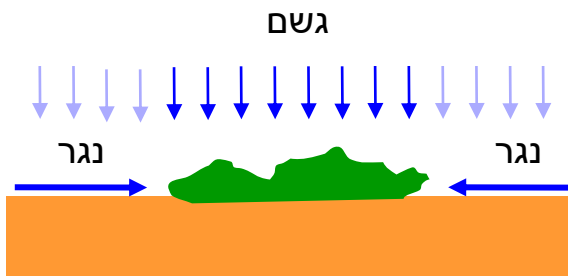


מספר מנגנונים של תנועת מים:



בשעה שהמשוב פועל להאצת הגידול המקומי הוא מעכב את הגידול מסביב  
□ אי-יציבות של צמחיה אחידה והופעה של תבנית כתמי צומח.

## יצירת התבנית המרחבית היא אמצעי לשרוד מחסור במים:



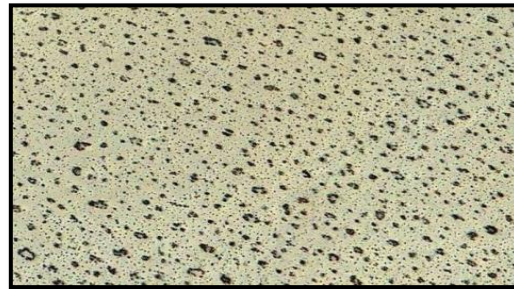
לכל כתם של צומח יש כעת מקור מים נוסף – תנועת המים מהאזור החשוף שמסביבו, לדוגמא נגר עילי:

אבל תגובת המערכת יכולה להיות מורכבת יותר בגלל רמות הארגון השונות שיש בה:

**רמת החברה – קבוצה של אוכלוסיות ממינים שונים**



**רמת האוכלוסיה – קבוצה של פרטים מאותו המין**



**רמת הפרט – צמח בודד של מין מסויים**



תגובת המערכת למחסור במים יכולה להיות בכל אחת מרמות הארגון:  
ברמת הפרט – ע"י התארכות השורשים כדי לשמור על רמת קליטת המים,  
**ברמת האוכלוסיה – ע"י יצירת תבניות,**  
ברמת החברה – ע"י שינוי הרכב החברה.

תגובות ברמות ארגון שונות יכולות להשפיע זו על זו – תחום חשוב שכמעט לא נחקר, במיוחד לא הדרך שבה תבניות משפיעות על מנגנונים ברמת הפרט וברמת החברה

**מודל מתמטי:** ניסוח המשובים החיוביים בין גידול צומח ותנועת מים אליו בצורה מתמטית, באמצעות משתני ביומסה ומים ובנית משוואות עבור המשתנים האלו.

הזנת התפלגויות ביומסה  
ומים התחלתיות →



→ קבלת התפלגויות  
מרחביות בכל זמן עתידי

בעזרת המודל אפשר לחקור את הופעת התבניות ואיך הן משתנות עם הקטנת כמות המשקעים:

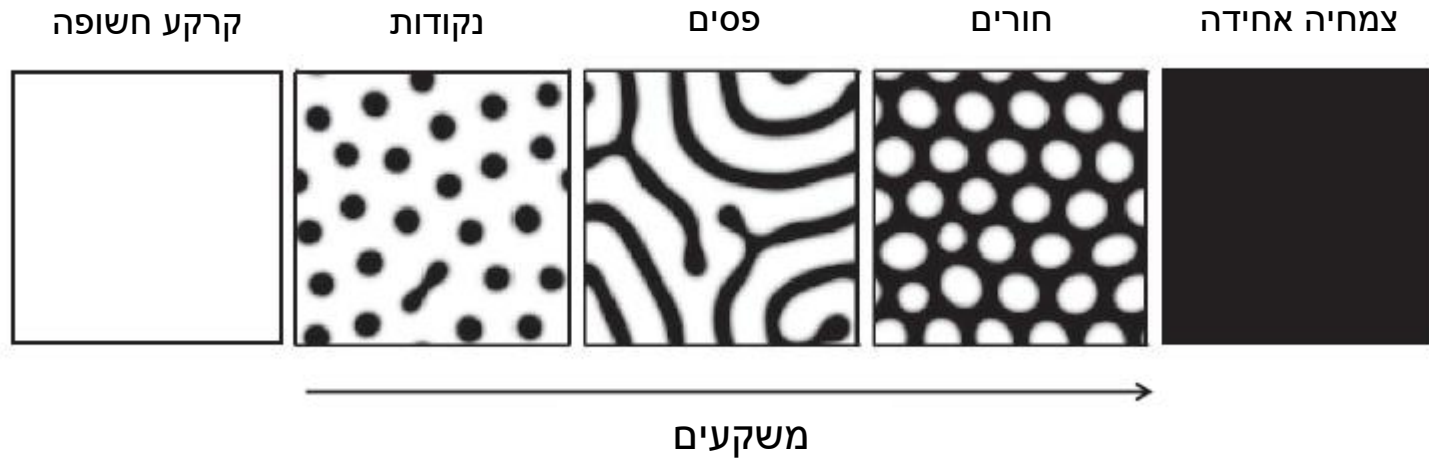
צמחיה אחידה באזור מישורי מאבדת יציבות לתבנית חורים; המים שהחורים תורמים מפצים על הקטנת המשקעים – זוהי דוגמא **לאי יציבות טיורינג**

**המשך הקטנת כמות המשקעים מחייבת הגדלת המקור הנוסף של מים - השטחים החשופים, דבר שמוביל לשינוי מורפולוגי:**

תחילה תבנית פסים (מבוך) ובהקטנה נוספת של המשקעים - תבנית נקודות

יותר מכך – ערכי משקעים שבהם ישנם **מצבים יציבים אלטרנטיביים**. לדוגמא ב- 120 מ"מ בשנה תבנית נקודות יציבה ומצב יציב של קרקע חשופה. לריבוי מצבים יציבים משמעות גדולה שעוד נעמוד עליה.

# המודל חוזה חמישה מצבי צמחיה בסיסיים לאורך מפל הגשם:



סדרת מצבים אוניברסלית שנמצאה במערכות שונות: ריאקציות כימיות, זורמים ועוד.

מצבי הצמחיה הבסיסיים וההתאמה שלהם לכמות המשקעים נמצאו בתצפיות:

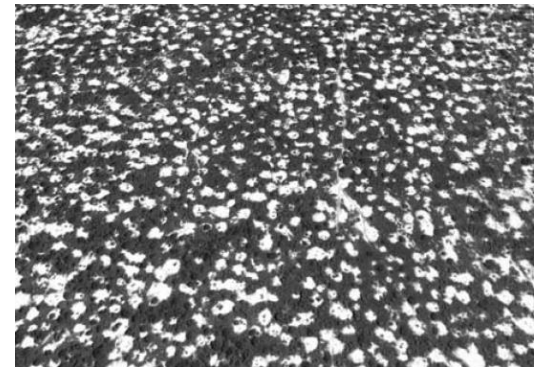
תבנית נקודות בזמביה



תבנית פסים בניג'ר



תבנית חורים בסנגל

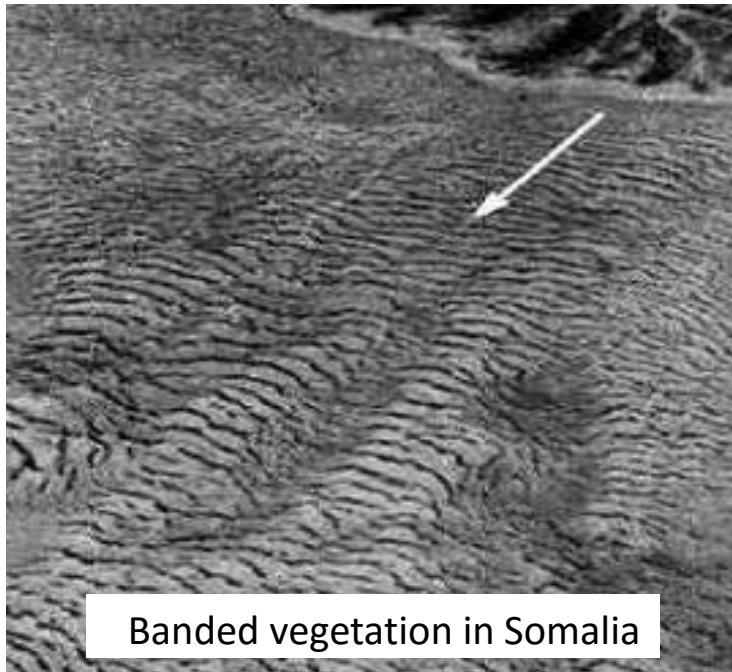
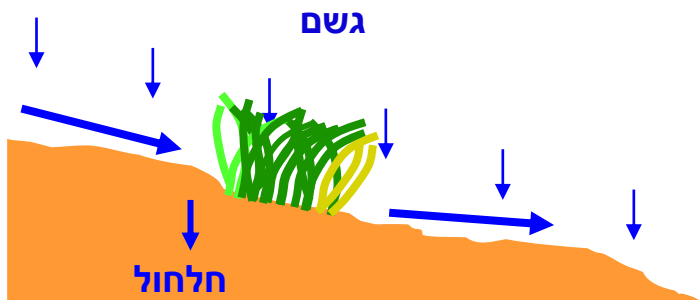


## אזור משופע: כיוון מועדף – כיוון זרימת המים

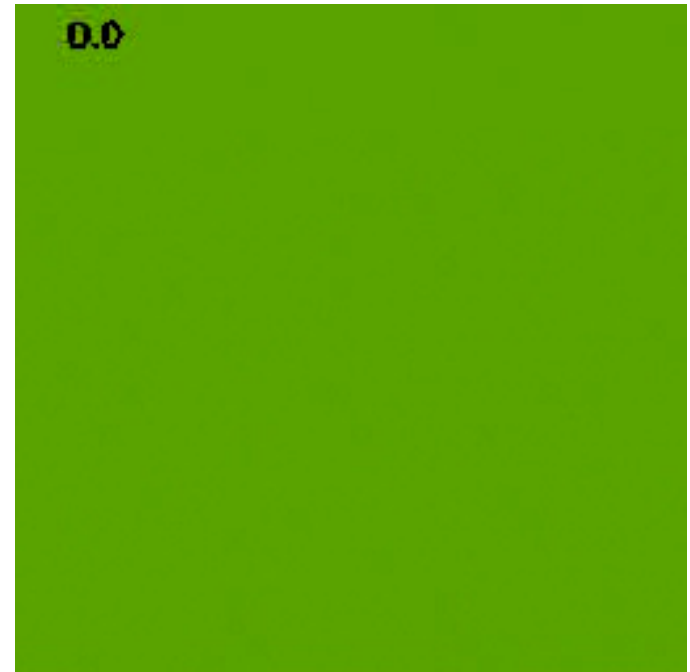
שוני ביחס לקרקע מישורית:

1. נטיה חזקה יותר ליצירת תבנית פסים שמסתדרים בניצב לכיוון השיפוע
2. הפסים נעים במעלה השיפוע

מנגנון התנועה למעלה:



מורד השיפוע

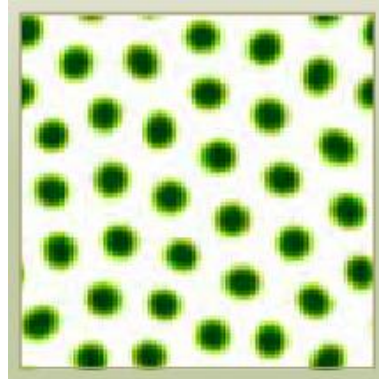
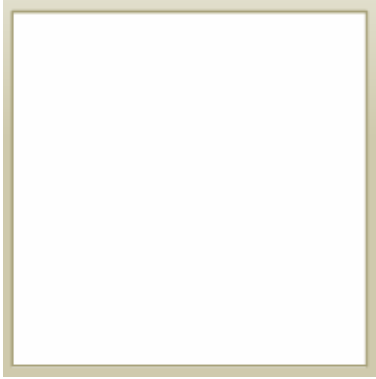


## ריבוי של מצבים יציבים

דברנו על מצבים יציבים אלטרנטיביים:  
שני מצבים יציבים שונים באותה כמות  
משקעים - 120 מ"מ בשנה סימולציה  
של המודל

מצב מדבר:  
קרקע חשופה

מצב צמחיה:  
תבנית נקודות



## מה גורם לריבוי של מצבים יציבים?

אם קיים כתם צומח הוא ישרוד כי:

1. הוא מגדיל את קצב החלחול ומושך אליו מים מהסביבה
2. הוא יוצר הצללה שמקטינה את אידוי המים
3. נשר העלים מתפרק והופך למזון

אם לא קיים כתם צומח הקרקע תישאר חשופה כי:

1. המים לא יחלחלו בה אלא יזרמו דרכה הלאה
2. קצב אידוי המים גבוה
3. זרימת המים יכולה לגרום לשחיקת השכבה הפוריה של הקרקע



## ריבוי של מצבים יציבים מתקיים גם בהקשרים אחרים:

### צומח על דיונות חול בדרום אפריקה – רוחות חזקות וכמות משקעים גבוהה:

1. בקרקע חשופה, הרוח החזקה מסיעה את שכבת גרגירי החול העליונה (דיונה פעילה) ומונעת נביטה. בכך היא מייצבת את הקרקע החשופה.
2. בקרקע מכוסה בצומח עוצמת הרוח על פני הקרקע קטנה, הדיונה מיוצבת, וכמות המשקעים הגבוהה מאפשרת לצומח להמשיך להתקיים



### סוואנה (משטחי דשא עם כתמי עצים):

1. במשטח הדשא, הכיסוי הצפוף מקשה על זרעי המעוצים לנבוט ולאלו שנבטו יש תחרות חזקה מצד העשבונים על המים ומרכיבי המזון בשכבת הקרקע העליונה.
2. בכתמי העצים, הנשר מקשה על נביטה של העשבונים וההצללה מונעת מהם אור.

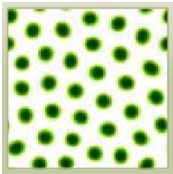


## מהי המשמעות של ריבוי מצבים יציבים מבחינת התנהגות המערכת?

המשמעות היא התכנותם של מעברים "קטסטרופיים" בין המצבים כתוצאה משינויים סביבתיים קטנים. מעברים כאלו מלווים בשינויים חדים, מהירים ובלתי הפיכים בתכונות המערכת. דוגמא למעבר קטסטרופי הוא מדבור.

מדבור מוגדר כירידה חדה ובלתי הפיכה בפוריות הביולוגית של מערכת אקולוגית כתוצאה משינוי סביבתי, כמו בצורת, או כתוצאה מפעילויות אדם כמו כריתה, רעיה וכו'.

מדבור שהתרחש בצפון הנגב ב-2008-9



מעבר ממצב פורה (שיש בו ייצור ביומסה) של תבנית נקודות של שיחים



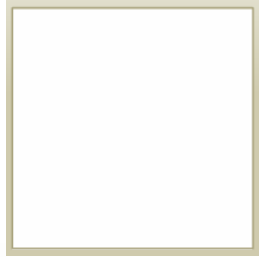
למצב בלתי פורה של קרקע חשופה (מדבר) כתוצאה מבצורת.

המעבר הוא חד (התרחש בפחות משנתיים) וכנראה בלתי הפיך במובן שגם אם כמות המשקעים תחזור לרמה המקורית השיחים לא ינבטו מחדש.

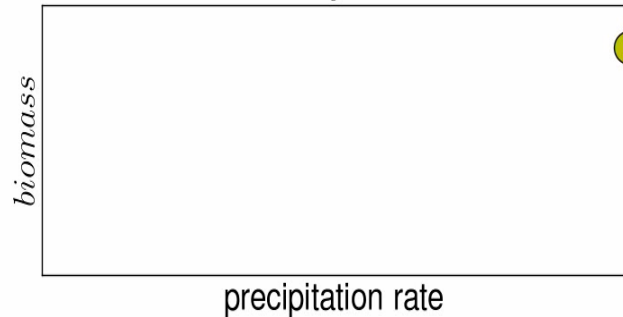
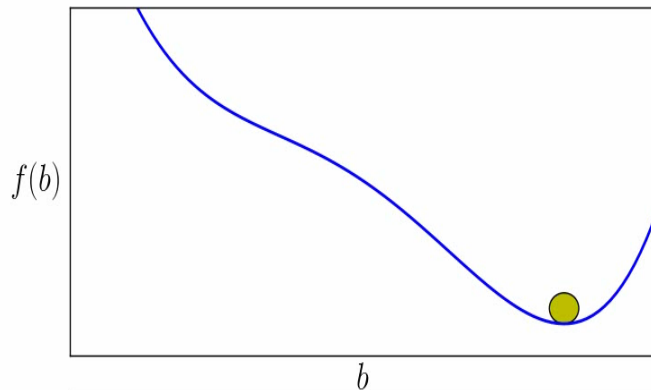
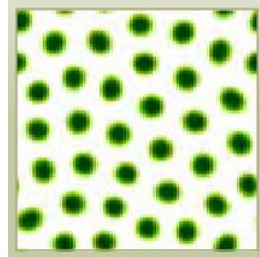


## מדוע קיומם של שני מצבים יציבים אלטרנטיביים מאפשר מעברים קטסטרופיים?

מצב מדבר:  
קרקע חשופה

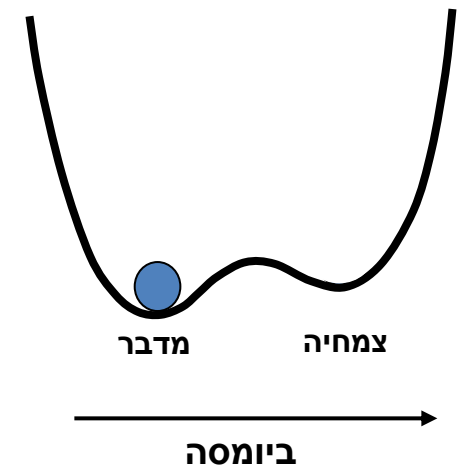


מצב צמחיה:  
תבנית נקודות



או מדוע קיומו של טווח משקעים שבו שני המצבים, תבנית נקודות וקרקע חשופה, הם יציבים מאפשר מדבור?

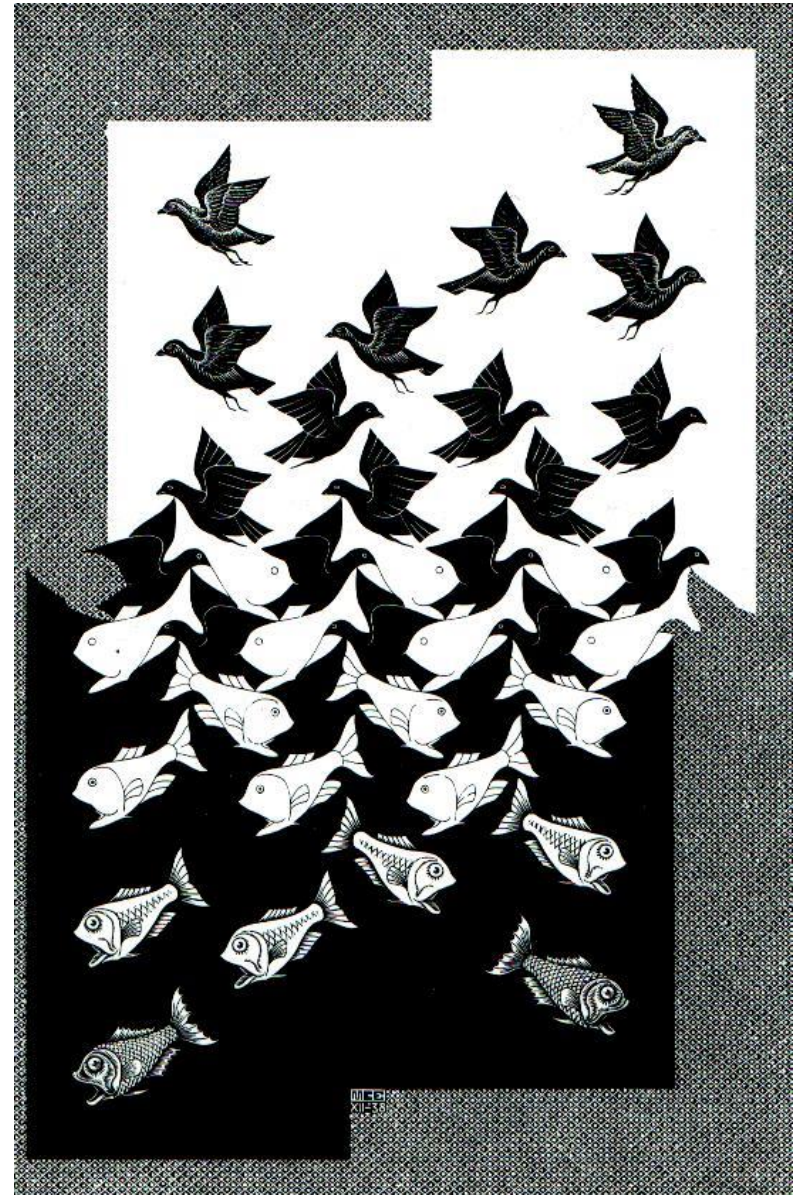
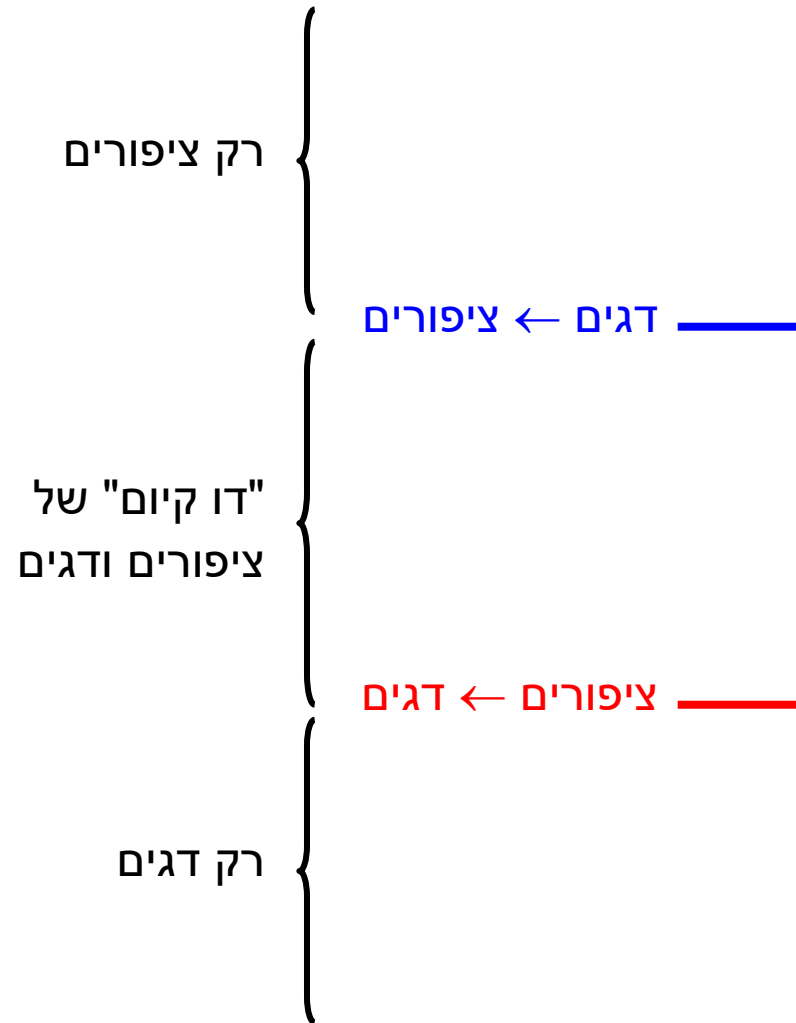
הבעיה דומה לזו של כדור הנע על פני משטח עם שני בורות:

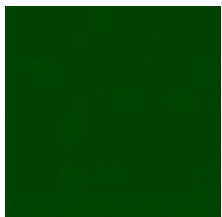


האפקט של שינוי כמות המשקעים הוא עיוות המשטח

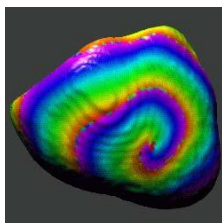
המעבר צמחיה ← מדבר הוא חד, למרות שהשינוי בכמות המשקעים הוא איטי, והמעבר בלתי הפיך בגלל קיומו של טווח משקעים שבו שני הבורות קיימים (שני המצבים יציבים)

התלות של נקודת המעבר בהסטוריה של המערכת, האם היתה קודם ברמת משקעים גבוהה יותר או נמוכה יותר, מכונה **היסטרזיס**. תופעה מאד כללית וקיימת גם בציורים של אשר:





דברנו על אי יציבויות שמולידות תבניות מחזוריות במרחב ונייחות בזמן. קיימות אי-יציבויות אחרות שמולידות תנודות בזמן. אי יציבויות אלו מאפשרות [תופעות גלים כמו גלי מטרה וספירלה](#).



אמרנו "תבניות או לא להיות" כי במקרים רבים יצירת תבניות היא אמצעי מערכתי להתגבר על מחסור במשאב חיוני ולשרוד. אבל תבניות לא תמיד רצויות; לדוגמא, גלי ספירלה בשריר הלב יכולים לגרום לפיברילציה. במקרה זה נכון יותר לומר "להיות או תבניות".

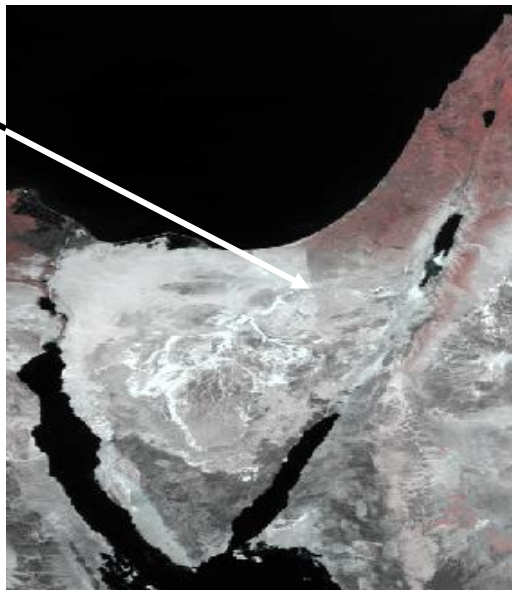
## תמשיכו לחשוב ולשתות ולא בתבניות – תחשבו אחרת!





→  
Areal photographs  
Egypt-Israel border

Soil crust



Karnieli

