

## עדות לשינוי אקלים בעבר

### **ד"ר שמוליק מרקו, החוג לגיאופיסיקה ומדעים פלנטריים**

#### **אקלים :**

ישנו ויכוח האם התחממות כדה"א היא תוצאת האנושות או תהליך טבעי. נראה כיצד יודעים מה היה בעבר, מה השיטות לבדיקה. אנו חלק ממערכת השמש ולכדה"א שני שכנים: הפלנטה מאדים – בערך 50- מעלות בממוצע, אין מים; הפלנטה ונוס הקרובה יותר לשמש – 450 מעלות טמפ' ממוצעת על השטח. המקום היחיד בו יש מים נוזליים – כדה"א, וזהו המקום היחיד בו נמצאו חיים. החיים תלויים באטמוספירה והאקלים.

#### **האקלים אינו קבוע מהסיבות :**

- שינויי מרחקים מהשמש, מסלול ההקפה משתנה.
- אפקט החממה.
- שינויים ביכולת כדה"א להחזיר קרינה – אלבדו.
- פיזור החום על פני כדה"א נעשה ע"י מעבר מים באוקיינוסים, למשל זרם הגולף המחמם את דרום אנגליה. ישנם שינויים בזרמים.
- שינויים בפליטת השמש.
- טקטוניקת הלוחות – שינויי מיקומי היבשות.

#### **חלוקה לאזורי אקלים של כדה"א :**

האזור המשווני עם רצועת עננים – גם חם וגם גשום; לאחריו איזור יבש, מעט עננים. אזורים אלו גובלים עם אזורים ממוזגים, ובקטבים – אקלים ארקטי. הסיבה היא שקרני השמש המגיעות בערך במקביל לכדה"א, וקרן הפוגעת במשווה מתפזרת על שטח קטן יותר מאשר בקטבים, והמסלול עד לפגיעה ארוך יותר בפגעים. לכן אוויר חם ולח מאידוי עולה במשווה, ואז יש גשמים רבים. לכן באזור המשווני יש חום, לחות וגשם. האוויר שהתקרר יורד בשוליים, ובירידת האוויר הטמפ' עולה. אוויר חם ויבש יוצר מדבר – ולכן משני עברי האזור המשווני הטרופי יש רצועות מדבריות. בקיצור, יש רצועות די קבועות של אקלים על פני כדה"א.

#### **שינויים בעוצמת הקרינה מהשמש מאז היווצרותה :**

מדוע טרוויאלי שיש שינויי אקלים על פני פרקי זמן ארוכים? הקו האדום (במצגת) מראה את עוצמת הקרינה של השמש. קרינת השמש הלכה ועלתה מאז היווצרותו לפני 4.5 מיליארד שנים. לאורך כל הזמן תמיד היו על כדה"א מים נוזליים ותמיד התקיימו חיים. טמפ' כדה"א לעומת זאת, הלכה וירדה, וכמות ה-CO2 הלכה וירדה גם כן.

#### **שינויים בעוצמת הקרינה של השמש :**

כרגע אנו בתקופת מינימום מבחינת עוצמת הקרינה של השמש. ניתן לראות מחזוריות מסויימת ואין קורלציה בין נתונים אלו לשינויי האקלים.

#### **אפקט החממה :**

הקרינה עוברת באטמ' וכמעט ולא עושה אינטראקציה איתה, בחזרת הקרינה חלק נשאר אגור באטמוספירה. יורד גזי חממה – יהיה חם יותר, פחות – קרינה חוזרת תצא חזרה מכדה"א.

#### **גזי חממה באטמוספירה :**

הגזים CO2, מתאן ואדי מים – הגזים העיקריים. האחרים בעלי כמות קטנה כך שאינם משמעותיים. כאשר מסתכלים על כלל הגורמים המשפיעים על מאזן הקרינה בכדה"א, ניתן לחלק זאת במספר אופנים:

1. מה גורם לחימום ומה גורם לקירור.
  2. גורמים טבעיים מול גורמים בשליטת האדם.
- ה-CO2 גורם חימום, כמו גם אירוסולים היוצרים צל. ישנה אי ודאות לגבי חלק מהגורמים המביאים לקירור, עד כמה מביאים למאזן את טמפ' כדה"א. ה-IPCC – גוף החוקר את שינויי האקלים. מסקנת הגוף היא שבסה"כ הטמפ' במגמת חימום, והתרומה לכך מהאנושות.

#### **גורמים טבעיים :**

- לאחר התפרצויות הרי געש היתה ירידה בטמפ'. אפר מגיע לאטמ' וחלק גדול מהקרינה נחסם – משפיע על מזג האוויר בעולם. אבל, לא תמיד מושפע מזג האוויר (אקלים – מזג אוויר על גבי פרק זמן ארוך) מהרי הגעש. בכל זאת, נראה כי השנים שאחרי ההתפרצות קרות יותר מאשר השנים שלפני ההתפרצות.
- תהליכים גיאולוגיים: למשל, הודו נדה מדרום לקו המשווה עד התנגשות עם אסיה (הרי ההימליה) – תהליך של 70 מליון שנה. במהלך שינויים אלו הודו עברה דרך מספר אזורי אקלים שונים. ניתן לראות עדות לכך בסוגי סלעים שונים.

#### **עדות לשינויי אקלים בעבר :**

- שינויים בישה: תפוצת קרחונים, גודל האגמים (יותר גשום – אגם יותר גדול, אידיז גם כן משפיע), נחלים (לא ידובר).
- שינויים באוקיינוסים.

**גיאולוגיה:**

אגם הליסאן (השתרע על פני אזור רצועת ים המלח- כנרת): סלעים באזור ים המלח בעלי מאפיינים של משקעים שנוצרו על קרקעית אגם – לפי הרכבם ולפי כך שאין עדות ליצורים (שכן אין יצורים על קרקעית עמוקה). אזור זה השתרע על פני רצועה ארוכה, 170- מ' מפני הים (הרבה מעל ים המלח כיום). מאגם זה נותרו הכנרת וים המלח.

תצורת הסלע שקעה בצורה שונה בחורף ובקיץ: בקיץ שקעה הרצועה הלבנה. בקיץ היה אידוי רב, ונוצרו גבישים רבים – לבן; בחורף – משקעים ושטפונות צבעו את השכבה בחום. בתוך רצף השכבות רואים תקופות בהם משקעי החורף היו דומיננטיים, ותקופות של משקעים בערך מאוזנים של חורף וקיץ. כלומר נראה שינוי באקלים – שינוי מז"א לאורך זמן רב.

עדות נוספת: גלונים הנוצרים כשהמפלס נמוך, והקרקעית מרגישה את הגלים על פני המים. בעומק של למעלה מכמה עשרות ס"מ הגלונים לא נוצרים. לכן גלונים מעידים על ירידת מפלס – מפורש כאידוי מוגבר ופחות גשם. המדרגות שנראות הן ירידה שנתית של מפלס האגם. ים המלח מאבד כיום כמטר ממפלסו מדי שנה.

**מפלסי הכנרת וים המלח:**

נבחן האם יש השפעה של שינויי המפלס = שינויי האקלים על ההיסטוריה האנושית באזור. מהתצפית עולה שבו "ז השלטון והחקלאות הביזנטית נחלשה, שבטים של ערבים מחצי האי ערב הגיעה לאזור ובאותו זמן היה שינוי דרסטי באקלים.

**קורלציה עם אירועי היינריך מהאוקיינוסים:**

רואים שינויים משמעותיים במפלס לאורך 45 אלף שנה, כאשר השיא היה לפני 26 אלף שנה. כאשר משווים את השינויים עם מפלס האוקיינוסים, רואים כי התופעה אינה מקומית אלא גלובלית. היינריך תיעד את השינויים בעזרת קידוחים בקרקעית האוקיינוס. נמצאו גושי סלע יבשתיים באמצע האוקיינוס. התיאוריה היא שקרחונים נפלו לים, צפו וכשנמסו הסלעים שהיו על הקרחון שקעו לקרקעית.

**שינויי נפח קרחונים ועליית קו הקרח:**

נמצאו שרידי קרחונים במקום בו כיום אין קרחונים: משטחי סלע שכאילו הוחלקו ע"י פצירה. ההסבר: כשהיה קרחון, הוא נוצר בהר למעלה. הקרחון כלא בתוכו אבנים וגושי סלע. כאשר בקרחון מחליק במורד, האבנים בו שורטות את הסלע ומשייפות אותו בצורה מובהקת.

**שינויי נפח קרחונים:**

*Grey glacier*: עמק ענק מלא קרח, קרחונים הגולשים מההרים ויוצרים קרחון ענק (1980). שנת 2000 – הקרח כבר נעלם.

ניתן לזהות עד היכן הקרח הגיע פעם: כשהקרחון גולש הוא דוחף את האדמה, וכשנמס נשארים עקבות בשטח – מורנה.

אזורים שפעם היו מכוסים קרחונים מרובים בצפון קנדה, סיביר, סקנדינביה. כל האזור הזה מראה את התחתית של כיפת קרח ענקית שהיתה שם.

מיפוי תופעות כאלה נותן את תפוצת הקרחונים. תופעה נוספת: עמק בצורת U הנוצר כאשר קרחון גולש, לעומת צורת V שנוצרת ע"י שחיקת מים.

רפסודות קרח – סלעי ענק הנמצאים על מישור ענק, שאין להם מהיכן להגיע וברור שהתגלגלו מהיכן שהוא. סלעים אלו הגיעו לאזור ע"י רפסודות קרח – קרחון שהגיע לעמק גדול, נמס, והאבנים שהיו עליו נשארו על המישור – סלעים אלו קרויים *erratics*.

**השינויים במסת הקרחונים בעולם:**

נראים שינויים דרמטיים במסת הקרחונים – ירידה משמעותית.

**שיא תפוצת הקרחונים בפלייסטוקן:**

לפני כ-18 אלף שנה, סקנדינביה, צפון אירופה, צפון אמריקה ואזורים נרחבים רבים היו מכוסים קרח, כמו גם קרח הים. כשקרח מאופסן בכמויות כה גדולות על היבשה, מפלס הים נמוך. בתקופה בין קרחונית מפלס הים גבוה. כיום אנו יוצאים מתקופת הקרח הזו. עדויות לעליית מפלס הים – באר חפורה המכוסה במים בימי גאות מהווה עדות לכך שמפלס המים היה נמוך יותר, והבאר היתה למים מתוקים שירדו מהכרמל ונספגו בחול.

מכאן התובנה: שינויים כאלו של עליית / ירידת מפלס מורגשת בצורה איטית ומתונה, ולא באופן דרסטי.

**שיטה נוספת:**

הדמיית לווין של פני שטח מסויים בסהרה המציג נהרות מאובנים. הסהרה היתה כמו הסוואנה באפריקה כיום, ירוקה ומרובת חיים.

דוגמאות לאטמוספירה קדומה: שלג הופך לקרח אט אט. שלג מכיל מעט מים ואוויר רב, וקיפאון והפשרה לסירוגין יוצר קרח המכיל קצת בועות אוויר.

בועות אלו נשארות כלאות בקרח כל זמן שלא מפשירים את הקרח. אם כן, בדיקת גלעיני קרח עתיק ע"י אנליזה כימית יכולה ללמד על הרכבי אוויר קדום. קידוחים כאלו נעשו בגרינלנד ואנטרקטיקה, והתקבל רקורד של מאות אלפי שנים. שכבות בקרחון: פסים כהים בקרחון הם למעשה אבק ואפר

וולקני שניתן לתארו. מופו תכולת המתאן, תכולת ה-CO2 והטמ' שחישבו לפי מודל כלשהו על תכולת הגזים, וניתן לראות לאורך 400 אלף שנה מספר מאפיינים:

- הצורה הכללית היא שיניים.

- עלייה תלולה וירידה פחות תלולה עם עליות מקומיות לאורך הירידה.

- נקודות המינימום והמקסימום סחות או יותר באותו טווח.

כיום אנו נמצאים באזור נקודת מקסימום קיצונית ביותר, החורגת מהטווחים שנראו במדידות של מאות אלפי שנים, גם מבחינת כמות מתאן וגם

מבחינת כמות CO2 באטמוספירה.

אריאל סטולרמן

**שינוי בטמפ' :**

בעמדת מדידת כמות CO2 החל משנת 55 בהוואי רואים מגמת עליה ברורה, וזאת בקורלציה לטמפ'.

**שינויים בריכוז גזי החממה :**

מאז המהפיכה התעשייתית רואים גידול משמעותי בכל הגורמים המביאים לעליית הטמפ'. למשל: גידול האוכלוסיה, מתאן, CO2.

**שיטה נוספת :**

ישנן מולקולות מים נדירות הכבדות יותר מאחרות – O18 ולא O16. מולקולות מים עם חמצן קל מתאדים בקלות, כלומר לאחר אידוי העננים מועשרים בחמצן קל והמים בחמצן כבד. כך גם הפוך כאשר יורד גשם – הענן משיל יותר מולקולות עם חמצן כבד למים ולכן מכיל יותר מולקולות עם חמצן קל. מינים שונים שצריכים תנאים מאוד ספציפיים מסייעים באפיון הסביבה והתקופה בה נמצאו. למשל, יצורים שבונים את השלד מהמים – ובין היתר ניתן לבדוק בהרכבי השלדים את ההרכב האיזוטופי של המים (מולקולות עם חמצן כבד או קל). לפי זה ניתן לדעת מה היה הרכב המים. באזור המשווני מתאדים הרבה מים ויורד הרבה גשם – לכן בעננים ישאר חמצן קל. עננים שמגיעים מהאזור המשווני לאזור הארקטי יביאו עמם גשם קל, ורוב הקרח שיווצר מהגשם של עננים אלו יווצר מחמצן קל. כל זמן שנבנה קרח, רוב הקרח היה קל. בתקופה בינקרחונית, ישנו שטף של מים כבדים מהאוקיינוסים. שורה תחתונה: אם נראים ייצורים המורכבים מאיזוטופים קלים – עדות לתקופה בינקרחונית. איזוטופים כבדים – עדות לתקופה קרחונית.

בדיקת קרקעית האוקיינוס באותה שיטה: נראית גם שם אסימטריה ודגם שיניים לאורך 500 אלף שנים, וזאת בסינכרון למקורות אחרים (כגון קידוחי הקרח).

**מה מכתוב את המחזוריות :**

מחזוריות כדה"א לעתים יותר מעגלי ולעתים יותר אליפטי (אקצנטרי), במחזוריות של מאה אלף שנה. במסלול האליפטי יותר רחוקים מהשמש ולכן יותר קר. כמו כן, בהקפת כדור הארץ נוצר מישור המלקה, וזווית סיבוב כדה"א סביב עצמו היא בזווית של 24 מעלות ביחס למישור המלקה. זווית הנטיה משתנה במחזוריות של בערך 40,000 שנה ומשפיעה על האקלים. תנועה נוספת הגורמת לשינוי: פרצסיה, שינוי במחזוריות של 20 אלף שנה. כל אחת מהתנועות הנ"ל יכולות לגרום להפחתה או הגברה בחום, וכשלושת התופעות מתחברות לחום – מקבלים תקופה חמה, ולקור – תקופה קרה. אלו גרמו לתקופות הקרח. מחזורים אלו קרויים מחזורי מילנקוביץ.

**עידני קרח (ללא קשר למחזורי מילנקוביץ):**

לפני 4 מיליארד שנה ועד היום, היו רק בחמישה עידנים קרח בכדה"א כך שהצטבר לכדי קרחונים. ברוב הזמן קרח נמס בקיץ. מה גרם לעידני הקרח להופיע ולהיעלם לא ידוע. מחזורי מילנקוביץ' מסבירים מחזוריות תקופה קרחונית ובין קרחונית בתוך עידני הקרח, אך סיבת תחילתם וסופם של עידני הקרח לא ידועה. כיום אנו נמצאים בעידן קרח, ביציאה מתקופת קרח, אנו נמצאים בתקופה בינקרחונית.

בבדיקת שינויי הטמפרטורה הממוצעת ניתן לראות שמשנות ה-80 ישנה עליה מתמדת בטמפ' ביחס לטמפ' הממוצעת. הממוצע הוא בסביבות 15 מעלות. עליית טמפרטורה חזויה: בשנת 99 העריך ה-IPCC את עליית הטמפ' לפי מודלים שונים. מפלס הים עלה עד להתייצבות לפני כ-5000 שנה, ומסתבר שהחלה עלייה מחודשת במפלס הים.