

הארכיטקטורה בראי הביוספירה

הביוספירה היא התחום הצר על פני כדור הארץ שבו מתקיימים חיים. המחקר המדעי מגלה שהחיים והתפתחותם לאורך כ-3.5 ביליון שנה לא התרחשו מתוך הסתגלות אל תנאי כדור הארץ אלא מתוך אינטראקציה פעילה איתו. עולם החי עיצב את תנאי חייו, בעיקר באטמוספירה, וממשיך לקיים איתו שיווי משקל דינמי.

שיווי המשקל הזה נמצא היום בסכנת הפרה עקב פעילות המין האנושי בעשורים האחרונים, כאשר קצב והקף השינויים שהוא מחולל רחבים יותר מיכולת התגובה וכושר האיזון של הסביבה הטבעית.

נסיונות לחקות את התהליכים המתרחשים בביוספירה בסביבות מלאכותיות זכו עד כה להצלחה חלקית בלבד בגלל ידע מוגבל. עם זאת קיים ידע מספיק המאפשר לנו לתכנן וליצור סביבות חיים שיצמצמו את הקף הפגיעה באטמוספירה ואף יטו את המטוטלת לכיוון של שיקום הנזק.

עמוס יורן, אדריכל

ארכיטקט, מתכנן וזים בתחום האקולוגי. בוגר הטכניון ועסק במחקר באקולוגיה של בנינים באוניברסיטת קרנגי-מלון בפיטסבורג, ארה"ב. בעל משרד ארטיקוס (ARTIECOS: Artificial Ecosystems) המתמחה באדריכלות ירוקה ובמו"פ של טכנולוגיות אקולוגיות בבנינים.

הביוספירה היא התחום על פני כדור הארץ שבו מתקיימים חיים. רובו במרחב האטמוספרי ועל פני הקרקע ומיעוטו מתחת לפני האדמה. המחקר המדעי מגלה שהיווצרות החיים והתפתחותם לאורך כ-3.5 ביליון שנה לא התרחשה מתוך הסתגלות אל תנאי כדור הארץ אלא מתוך אינטראקציה פעילה איתו. עולם החי עיצב את תנאי חייו, בעיקר באטמוספירה, וממשיך לקיים איתו שיווי משקל דינמי. שיווי המשקל הזה נמצא היום בסכנת הפרה עקב פעילות המין האנושי בעשורים האחרונים, כאשר קצב והקף השינויים שהוא מחולל רחבים יותר מיכולת התגובה והאיזון של הסביבה הטבעית. נסיונות לחקות את התהליכים המתרחשים בביוספירה בסביבות מלאכותיות זכו עד כה להצלחה חלקית בלבד בגלל ידע מוגבל. עם זאת קיים ידע מספיק המאפשר לנו לתכנן וליצור סביבות חיים שיצמצמו את הקף הפגיעה באטמוספירה ואף יטו את המוטטלת לכיוון של שיקום הנזק.

ביוספירה 1

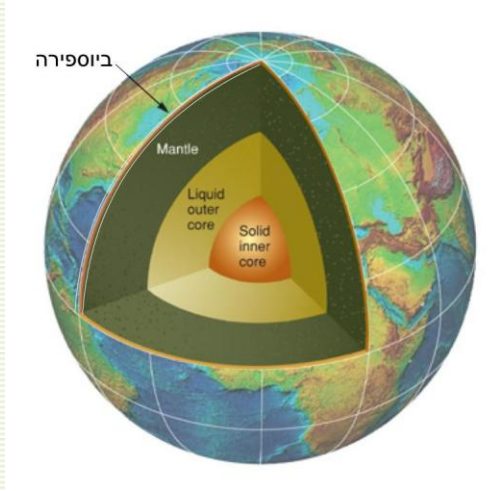
הביוספירה היא התחום על פני כדור הארץ שבו מתקיימים חיים. בתור שכזו היא מתפרסת מעומק של כ-500 מ' מתחת לפני הקרקע, שבה עדיין ניתן למצוא מיקרואורגניזמים החיים על מקורות מזון שחילחלו עם המים לעומק רב, ועד לאלפי מטרים בודדים מעל לפני הקרקע שבהם ניתן למצוא בני-אדם הטסים במטוסים [איורים 1א, 1ב]. הביוספירה היא מערכת אקולוגית סגורה, למעט מקור האנרגיה – קרינת השמש – המניע את כל התהליכים המתרחשים בה. הביוספירה עוברת תמורות מראשית קיומו של כדור הארץ, לפני כ-4.5 ביליון שנה. ההרכב הכימי והתהליכים האקלימיים שמתחוללים בה, התהוו ומתהווים מאינטראקציה מתמדת המתחוללת בין המרכיבים האנאורגניים שבה, במצבי הצבירה השונים (גזים, נוזלים ומוצקים) לבין המרכיבים החיים, מרמת החד-תאיים ומעלה, כשבקצה הרצף עומד המין האנושי, כיום מחולל השינוי הגדול ביותר של הרכב הביוספירה.

עדויות מאובנים של גופים מיקרוסקופיים הדומים לבקטריות בנות זמננו נמצאו בשכבות גאולוגיות שגילן 3.5 ביליון שנה. ואולם אורגניזמים רב-תאיים – צמחים ובעלי חיים – הופיעו, על פי המחקר הפלאונטולוגי, רק לפני 0.5 ביליון שנה. העדויות הקדומות ביותר של המין האנושי, זה הקרוי *Homo Sapiens Sapiens*, הם בני 35,000 שנה בלבד, רגע קצרצר בדברי ימי עולם החי על פני כדור הארץ.

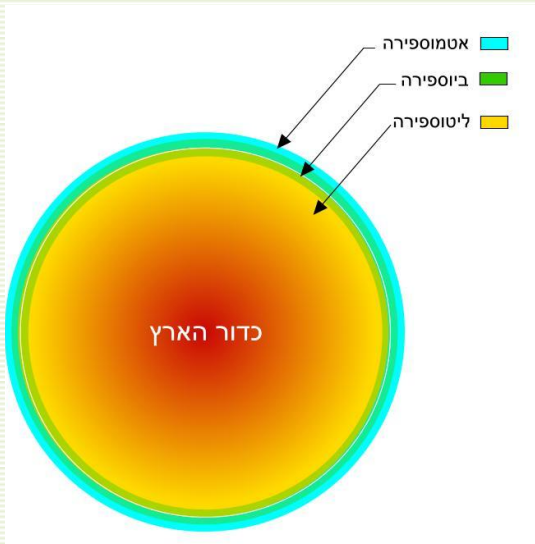
תורת האבולוציה של דארווין לא כללה התייחסות להשפעה של עולם החי והצומח על הסביבה הפיזית. בימיו, במחצית המאה ה-19, היה עדיין ידע מועט על ההרכב הכימי של האטמוספירה והאוקיאנוסים, כך שניתן להניח שהשפעת עולם החי על הסביבה מיעטה להעסיק את דרווין ובני דורו.

ההתייחסות הראשונה להשערה שהחי על פני כדור הארץ שינה אותו על מנת להתאימו לצרכיו הופיעה במאמר ב-*Scientific American* בשנת 1875. מאז קידמו מספר מדענים "חריגים" את ההשערה הזו, במחצית הראשונה של המאה ה-20, אך היה זה גיימס לובלוק (James Lovelock), מדען בריטי יוצא דופן, שפיתח היפותיזה מורכבת, המבוססת על נתונים ביו-כימיים ופיסיקליים, והפך אותה מהשערה לתאוריה לגיטימית¹. לעזרתו התגייסה המיקרו-ביולוגית האמריקאית הנודעת לין מרגוליס (Lynn Margulis). לתאוריה הזו נתן לובלוק את השם "גאיה" (Gaia) על שם אלת האדמה במיתולוגיה היוונית.

"האורגניזמים החד-תאיים המציאו את האסטרטגיות הכימיות והביולוגיות שאפשרו את היווצרותן של צורות החיים המורכבות יותר. במשך שלושת ביליון השנים האלה עבר התא התפתחות מרחיקת לכת. כאשר הופיעו האצות והיצורים הימיים הראשונים, המיקרובים



[א1]



[ב1]

כבר פיתחו כמעט את כל "ארגו הכלים" של שיטות ההסתגלות הביולוגיות: מגוון שיטות ניצול והמרת אנרגיה, תנועה, חישה רב-תחומית, מין, שיתוף-פעולה ותחרות. הם המציאו כמעט את כל הרפרטואר של החיים המוכרים לנו, למעט, אולי שפה ומוסיקה² [איור 2] (לן מרגוליס, מתוך "גאיה: דרך לדעת; ההשלכות הפוליטיות של הביולוגיה החדשה" (1987)

אילו תנאים שררו על פני כדור הארץ בראשית ימיהם של המיקרו-אורגניזמים הראשונים? על מנת להשיב על השאלה הזו צריך להתבונן בכוכבי הלכת חסרי החיים הסובבים יחד עם כדור הארץ במערכת השמש פחות או יותר באותו הזמן, לפני כ-4.5 ביליון שנה. אפשר להתייחס לכוכבי הלכת נוגה ומאדים ככוכבים בעלי היסטוריה אסטרונומית דומה לזו של כדור הארץ. עובדה זו אוששה ע"י הגששיות הרוסיות וונרה (Venera) 9 ו-10 ששוגרו לנוגה ב-1975 ולגששית וייקינג האמריקאית ששוגרה ב-1976 לחקור את המאדים. אחד ההבדלים המכריעים בין שני כוכבי לכת אלה לבין כדור הארץ היא הריכוז הגבוה במיוחד, בשעור של 21% של חמצן (O_2) יחד עם ריכוז נמוך ביותר בשעור של 0.03% של פחמן דו חמצני (CO_2) הנמצאים באטמוספירה של כדור הארץ, לעומת 98% דו תחמוצת הפחמן ופחות מ-1% של חמצן בשתי הראשונות. ההנחה היא שבעת היווצרותו היה הרכב הגאזים של האטמוספירה של כדור הארץ דומה לאלו של נוגה והמאדים. המרכיבים הקדם-ביוטיים כגון חומצות אמיניות, נוקלאוטידים וסוכרים, שהיוו את אבני היסוד של צורות החיים הראשונות, אינם יכולים להתקיים בסביבה של חמצן חופשי ועל כן יש להניח שהתנאים החיים הראשונים נוצרו על פני כדור הארץ נוצרו בסביבה חסרת חמצן.

החד-תאים הראשונים היו, אם כן, יצורים אנאירוביים, שהפיקו את האנרגיה הנחוצה לפעילותם מתסיסה של חומרים אורגניים. התפתחות חשובה באבולוציה של חד-תאים ראשונים היתה פיתוח המנגנון הפוטוסינתטי, שאפשר להם להפיק תרכובות אורגניות מתרכובות אנאורגניות באמצעות אנרגיית שמש. אך ההתפתחות המשמעותית ארעה כאשר נוצרו בקטריות שבתהליך המטבולי שלהם פלטו חמצן כפסולת, או תוצר לוואי של התהליך המטבולי. אלה הן הבקטריות הכחוליות, הציאנובקטריות, (cyanobacteria) המכונות לעתים בטעות כאצות הכחוליות [איור 3]. ההצלחה האקולוגית של הציאנובקטריות היתה עצומה. למעשה עד לזמן הזה לא היה אורגניזם חי שהשפיע בצורה כה מרחיקת לכת על האטמוספירה של כדור הארץ ועל הליתוספירה (הקליפה החיצונית של כדור הארץ) שבה מוצאים מרבצים של תרכובות חמצן עם יסודות אחרים, היינו התחמוצות למיניהם.

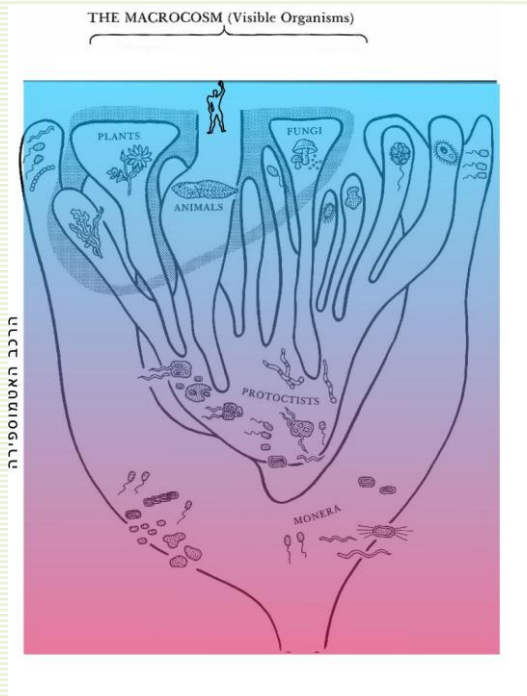
שלב ההתפתחות הבא היה אבולוציה של אורגניזמים שלמדו להשתמש בחמצן האטמוספרי כמרכיב בחילוף החומרים, בתהליך שהוא יעיל יותר מתסיסה. שכלול זה האיץ את האבולוציה של החי והביא ליצירת תאים גדולים יותר ולשיתוף פעולה מורכב בין צורות חיים פשוטות לשם יצירת אורגניזמים מרובי-תאים.

אין היום ספק שהתפתחות עולם החי ב-3.5 ביליון שנה תוך אינטראקציה עם סביבת כדור הארץ, היא שעיצבה את הביוספירה בה אנו חיים.

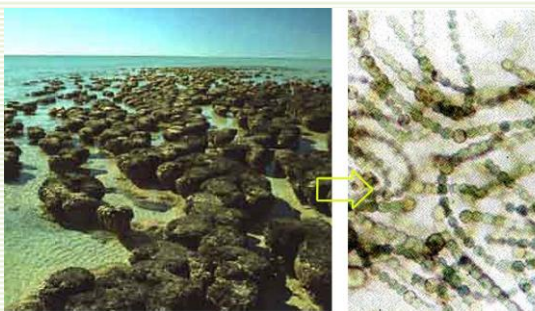
השרשרות הביו-כימיות שהתפתחו לאורך העתים, באמצעות יחסי הגומלין בין היצורים החיים ובינם לבין הסביבה, יצרו מנגנונים מורכבים של וויסות וייצוב תנאי הסביבה, או הומאוסטסיס (Homeostasis).

קחו למשל את השינוי בעוצמת הקרינה של השמש: מאז היווצרות מערכת השמש שלנו, וכדור הארץ בכללה, עלתה עוצמת הקרינה של השמש ב-30%. מזה שני ביליון שנה, מאז הופעתן של הבקטריות הכחוליות הפולטות חמצן, הלך והתייצב ריכוז החמצן באטמוספירה על 21% והוא עדיין נשמר, למרות השינויים בקרינה. אגב, לו היה ריכוז החמצן באטמוספירה מגיע ל-24%, היו פורצות דליקות ענק מהצתת ברקים ומכלות את כל הצומח והחי. מנגנוני הוויסות של עולם החי דואגות לייצוב הרכב הגאזים באטמוספירה שתמנע חריגה זו.

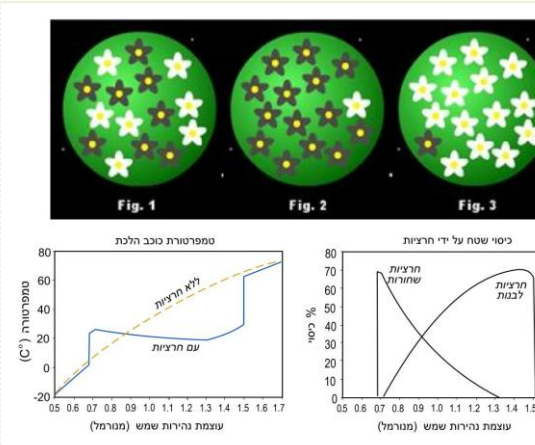
לובלוק הציע ניסוי סימולציה מעניין להמחשת מנגנון הבקרה הביוספירי בשם עולם המרגניות (Daisyworld)³ [איור 4]. בניסוי זה מומחש מנגנון וויסות טבעי של



[2]



[3]

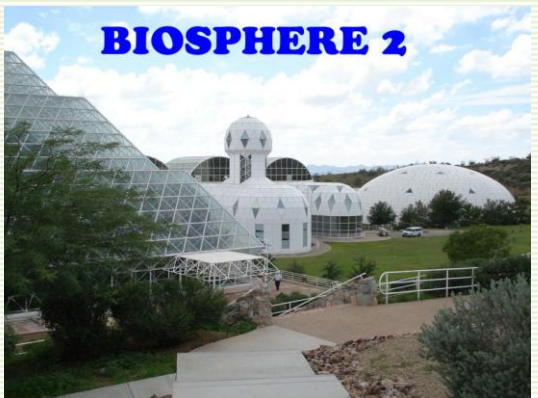




[5]



[6]



[7]



[8]

טמפרטורת האטמוספירה בעולם ההיפותטי החשוף לקרינה עולה מצד השמש, באמצעות שווי משקל דינמי בין שתי אוכלוסיות של מרגניות: מרגניות שחורות ומרגניות לבנות.

חוקרים אחרים הראו שככל שהמגוון הביולוגי עשיר יותר, מנגנוני הוויסות והבקרה יציבים יותר.

מנגנונים אלה נמצאים היום בסכנה אמיתית עקב פעילות אנושית.

ביוספירה 2

הפריצה לחלל בסוף שנות ה-50 ובשנות הששים של המאה ה-20, שגולת הכותרת שלה היתה הנחתת בני אדם על הירח, ביולי 1969, הפכה את ההתפרסות של המין האנושי מעבר לגבולות כדור הארץ לאפשרות שאינה חסרת סיכוי: בין אם בתחנות חלל ובין אם על כוכבי לכת אחרים (הירח ומאדים, למשל). האתגר הגדול שאליה נרתמו מדענים במדינות רבות, היה לתכנן, להקים ולהפעיל סביבות אקולוגיות סגורות היכולות להכיל בני אדם ולהתנהל בשיווי משקל דינמי עצמאי, ללא תשומות חיצוניות למעט אנרגיה. תחום המחקר הזה נקרא "מערכות אקולוגיות תומכות חיים מבוקרות" ⁴"Controlled Ecological Life Support Systems (CELSS)" וניסויים התקיימו בעיקר בברי"מ ובארה"ב (נאסא) [איור 5]

היוזמה השאפתנית בתחום הזה באה דווקא מצד המגזר הפרטי בארה"ב, כאשר אקולוג אמריקאי בשם ג'ון אלן (John P. Allen) שכנע ב-1985 מיליונר אמריקאי בשם אד באס (Ed Bass) להשקיע כ-200\$ מיליון להקמת מתקן שידמה את הביוספירה בתוך מעטפת סגורה של כ-12,700 מ"ר ^{6,5}.

למתקן הזה ניתן השם ביוספירה 2, והוא הוקם בקירבת העיר טוסון שבאריזונה (Tucson, Arizona). [איור 6]

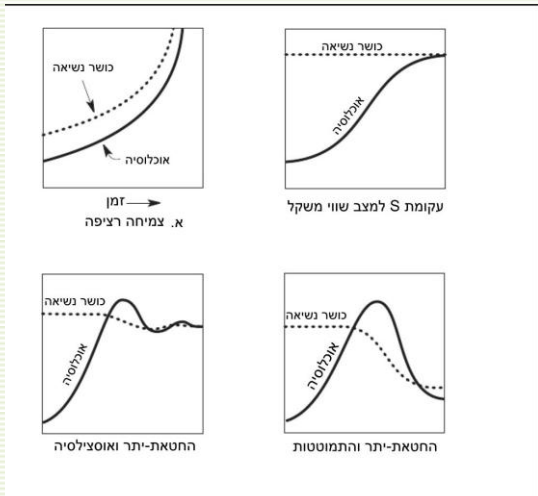
מתקן הניסוי גדול הממדים, כולו תחת כיפת זכוכית אטומה, הכיל מספר ביומים (biomes) ובהם יער גשם, אוקיאנוס, סאוואנה, ביצה, מדבר, שטח לחקלאות אינטנסיבית ומגורי אדם. כל צרכי הקיום של הצומח, החי ובכלל זה בני אדם, ובהם האוויר והמים, סופקו בתוך המערכת ללא השלמה מן החוץ; רק האנרגיה לחימום ולקרור הגיעה מהשמש דרך דפנות הזכוכית של האתר וחשמל שסופק מטורבינת גז מחוץ לביוספירה 2. [איור 7]

שתי קבוצות ניסוי שהו בתוך המתקן בזו אחר זו. הקבוצה הראשונה, בת 8 בני אדם, שהתה שנתיים בין 1991 ל-1993, ואילו הקבוצה השנייה, בת 7 חברים, איכלסה את המקום בין מרץ 1994 לספטמבר 1994 וסיימה את הניסוי בטרם עת בגלל סכסוכים. מידע מפורט אודות ההתנסות המעניינת הזו ניתן למצוא בהרחבה באתרים שונים באינטרנט (לדוגמא: www.biospherics.org). השורה התחתונה של יוזמה זו היא שעדיין לא היה די ידע לתכנן מערכת אקולוגית סגורה שתקיים שווי משקל דינמי יציב ותישא בני אדם: החמצן באטמוספירה הכלואה ירד מריכוז התחלתי של 20.9% לרמה של 14.5% אחרי 16 חודשים בלבד ורמת הפחמן הדו-חמצני נעה בתנודות יומיות של 600 ppm (חלקים למיליון) והגיע לעתים לרמות של 400 - 450 (הרמה הנורמלית של אטמוספירת הביוספירה עומדת על 388 ppm). כמות המזון שהנסיינים הצליחו לגדל היתה רק 83% מצריכת המזון הדרושה; כולם איבדו במשקל והמחסור במזון הביא למתחים ולמועקות של המשתתפים אם כי לא פגע משמעותית בבריאותם. [איור 8]

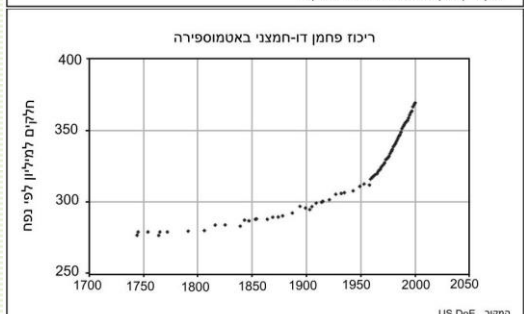
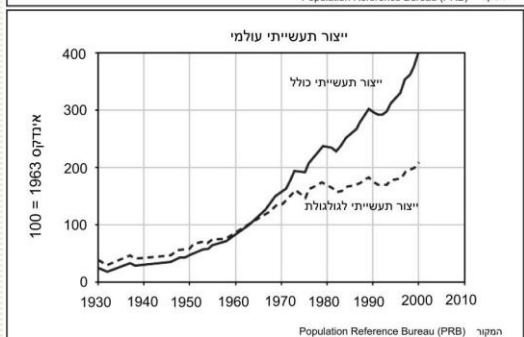
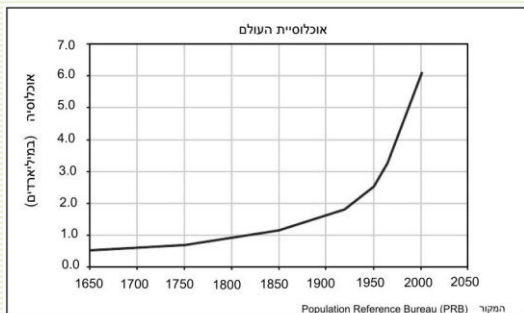
על בסיס הידע שהיה קיים בעת תכנון והקמת ביוספירה 2 אי אפשר היה לצפות את כל התהליכים ביו-כימיים שהתרחשו בחלל אטום זה. גורם בלתי צפוי מרכזי היתה התרבות-יתר של חיידקים בקרקע המתקן שהביאה לשחרור כמויות גבוהות מדי של



[9]



[10]



[11]

פחמן דו חמצני. אחד הממצאים המעניינים האחרים הוא שתנודות קיצוניות בהרכב הגאזים נגרם, בין השאר, מריאקציות בלתי צפויות עם חומרי בניה (בטון).

ב-1995 עברה האחריות למחקר בביוספירה 2 לידי אוניברסיטת קולומביה וב-2007 האחריות הועברה לאוניברסיטת אריזונה. האתר שינה את ייעודו ממחקר של מערכות סגורות למחקרים אקולוגיים בתחומים שונים.

מה שחשוב לציין בהקשר לביוספירה 2 הוא שהיא היוותה הזדמנות נדירה לראות "בתנאי מעבדה" כמה מורכבת האקוסיסטמה של הביוספירה שבה אנו חיים, כמה אנחנו עדיין לא יודעים על מגוונים של איזון ובקרה של מערכות טבעיות ומה הסכנות האורבות לנו אם נפר את האיזון האקולוגי העדין של הסביבה האחת והיחידה העומדת לרשותנו. יתכן וביוספירה 2 לא זכתה לתהודה שהיא ראויה. העובדה היא שבני האדם ממשיכים לפגוע בצורה מדאיגה בביוספירה. [איור 9]

במחקר שערכו קבוצת מדענים שזכו לשם "מועדון רומא" (Club of Rome) (www.clubofrome.org) ושפורסם לראשונה ב-1972, בשם גבולות הצמיחה (Limits to Growth)⁷ סימנו החוקרים את גבולות כושר הנשיאה של כדור הארץ מול גידול בלתי מרוסן בגודל האוכלוסיה האנושית והצמיחה הרבה עוד יותר ברמת החיים ובצריכת המשאבים הטבעיים. עבודתם של החוקרים האלה נמשכת עד היום ודוחות המשך מתפרסמים מפעם לפעם (⁸ Limits to Growth: The 30 year update, 2002). החוקרים מציגים מספר תרחישים קלאסיים מתורת המערכות על יחסי הגומלין האפשריים בין כושר הנשיאה של המערכת האקולוגית העולמית לבין שעור הצמיחה בצריכת המשאבים. [איור 10]

התמורות בהרכב הביוספירה ב-200 השנים האחרונות, גדולות יותר מאלה שב-2 ביליון השנים האחרונות, ואלה שב-20 השנים האחרונות יותר מאשר ב-200 השנים האחרונות.

גורם מרכזי בשינויים הללו הוא, כידוע, העליה החדה בשחרור גזי החממה לאטמוספירה, ובראשם הפחמן הדו-חמצני. עקומת העליה בשעור הריכוז של CO₂ עוקבת בצורה מדויקת אחר העליה בגודל האוכלוסייה בעולם, ובהקף הייצור התעשייתי, בפרט ב-200 השנים האחרונות, בעקבות המהפכה התעשייתית. [איור 11]

בביוספירה, מרבית בעלי החיים נושמים חמצן (O₂) מן האוויר ופולטים פחמן דו-חמצני (CO₂) כפסולת. צמחים שואפים את הפחמן הדו-חמצני הזה מן האוויר ובעזרת אנרגיה מן השמש בתוספת מים וחומרים מן הקרקע מייצרים סוכרים, עמילנים ותרכובות אחרות בתהליך הידוע כפוטוסינתזה. צמחים פולטים חמצן כפסולת. עולם החי ועולם הצומח התפתח, כאמור, במתואם לאורך כל תהליך האבולוציה. תוך כדי התהליך הזה הם שינו את הרכב האטמוספירה והליתוספירה.

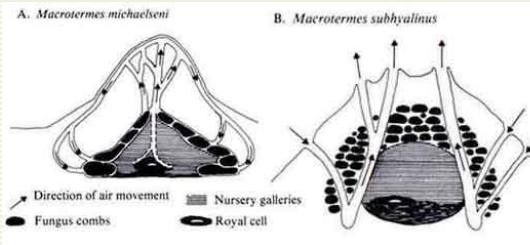
התרחיש המדאיג הוא זה הידוע כהחטאת-יתר (Overshoot), שבה המערכת איננה יכולה לחזור למצב שווי-משקל הקודם שלה ומתנוונת. בסופו של דבר היא יכולה להגיע לשווי-משקל דינמי מסוג אחר ואולי כזה שלא יוכל להתאים לחיים של המין האנושי (ויצורים רבים אחרים). מה שחשוב לציין הוא שצריכת יתר איננה מורגשת בטווח הקצר; איננו יודעים בהכרח שחצינו את קו האל-חזור. אך התוצאה יכולה להיות התרסקות שבה הקריסה איננה איטית כי אם מהירה ביותר. יש חוקרים המאמינים שביישום תוכנית פעולה מחושבת עדיין ניתן לייצב את המערכת האקולוגית הגלובלית. אחרים מאמינים שאחרנו את המועד. אחד מהם הוא ג'והן לובלוק, אבי תאוריית הגאיה, שתחזיתו פסימית ביותר. בספרו האחרון: הנקמה של גאיה⁹ (The Revenge of Gaia, 2006) הוא מציג תחזית עגומה ומנומקת להדרדרות החיים על פני הכדור הארץ עקב התנהלות המין האנושי.

ביוספירה 3 : הסביבה הבנויה כמערכת אקולוגיות מלאכותית

עדות אישית: ב-1978 הגעתי לאוניברסיטה אמריקאית לעסוק במחקר. הימים ימי משבר האנרגיה שבאה בעקבות אמברגו הנפט של מדינות אופק (OPEC). תקציבי מחקר רבים הועברו לאוניברסיטאות ולמכוני מחקר על מנת לפתח שיטות של חסכון באנרגיה, כשמלאי הבנינים, הצורך 40% מתצרוכת האנרגיה הכולל, מהווה יעד מרכזי להתייעלות. הקדשתי שנתיים של מחקר לפיתוח מודל אופטימיזציה לבחירת האסטרטגיות המעדפות להורדת צריכת האנרגיה בבנינים. ב-1980 התפרסמו המחקרים הראשונים על מצב זיהום האוויר בתוך בנינים. להפתעתם של החוקרים התברר שרמת זיהום האוויר, בבנינים שרמת האיטום שלהם גבוהה (על מנת לחסוך בחימום ובקור), גבוהה בהרבה מזו של הסביבה העירונית ומגיעה לרמות המסכנות את מאכלסיהם. הסקתי שמאמצי הקודמים היו מוטעים ושהיעד האמיתי בתכנון הוא ליצור תנאי סביבה תקינים בתוך בנינים. התייעלות אנרגטית חייבת לבוא בכפוף לתנאים אלה. מאנרגיה של בנינים עברתי לעסוק באקולוגיה של בנינים.

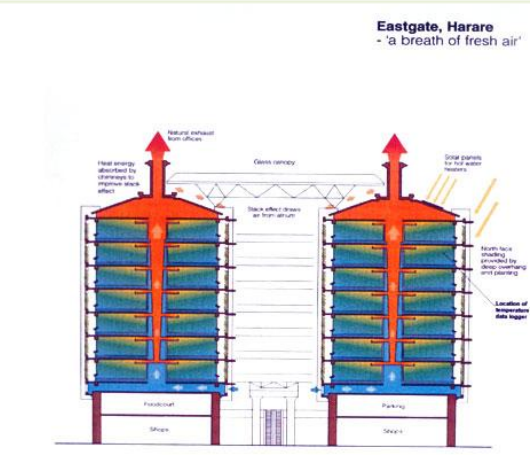


[12]



בנין הוא מערכת אקולוגית מלאכותית. המושג "מלאכותי" מתייחס לעובדה שבנין, כמתווך בין המשתמש לבין הסביבה הטבעית, הוא תוצר של תכנון אנושי לעומת הסביבה הטבעית שהיא תולדה של התהוות אבולוציונית [איור 12]. אנו מצפים שהתוצר הזה יספק תנאי חיים נוחים תוך ניצול אופטימלי של משאבים. אנו שואפים לנצל את מקורות האנרגיה של הסביבה הקרובה, ולעשות שימוש בחומרים זמינים שאינם עתירי אנרגיה באופן שיתקיימו תנאים של נוחות תרמית, איכות אוויר, רמות תאורה ותנאים אקוסטיים. האיזון בין הגורמים השונים הוא באחריות המתכנן, וכרוך בניצול מושכל של כוחות טבעיים, בבחירה מתאימה של חומרים ובשילוב מחושב של מערכות גיבוי טכניות - היינו אקוסיסטמה מלאכותית¹⁰.

העיסוק בתכנון אקולוגי של בנינים נסמך, לעתים קרובות, על חיקוי טכניקות מעולם החי, במה שקרוי ביו-ממטיקה (Biomimetics). דוגמה מאלפת היא זו של קן טרמיטים [termite mound] אפריקאי, שבו הפתרון של חומר הבניה (בוץ) ומערכת האיוורור הטבעית (מחילות וארוכות איוורור) שימשה עקרון מנחה במספר בנינים שנבנו בשנים האחרונות, כשאחד המעניינים שבהם הוא מרכז מסחרי גדול בעיר הררה שבזימבבואה¹¹ [איור 13]



[13]

טביעת הרגל האקולוגית של כל בנין היא ההשפעה שלו על הביוספירה. משום כך כל יצירה של בנין חדש או שדרוג של בנין קיים הכרוכה בצמצום פליטת גזי החממה, הקטנת צריכת המים, מיעוט השימוש בחומרים מתכלים ומזעור הפגיעה בסביבה הטבעית ובמגוון הביולוגי שבה תורם להאטת ההדירה של הביוספירה אל מצב של החטאת-יתר. ההשפעה של בנין - כל בנין - ובכל מקום היא גלובלית כי פליטת גזי החממה ודלדול המשאבים הטבעיים אינם מבחינים בגבולות גאוגרפיים ומדיניים. ועל כן הסיסמא של עוסקים בבניה ובהנדסה אקולוגית היא, בצדק: חשיבה גלובלית, עשייה מקומית (Think Globally, Act locally).

יש לרשותנו כיום הידע והטכנולוגיות ליצור בנינים בעלי צריכת אנרגיה כוללת אפס (zero energy buildings) ויש כבר ניצנים ראשונים של בנינים בעלי מאזן אנרגיה חיובי (positive energy buildings). במאמרים הבאים נתייחס לתכנון של בנינים כאלה.



[14]

לסיום: שינוי מתרחש לעתים רחוקות במעברים רציפים. הוא מתחולל במדרגות ובחציית סיפים. אולי בשל קוצר חיינו והעדר דמיון אנו נוטים להאמין שמה שאנו חווים היום ישתנה בגבולות צרים בלבד, ועם התערבות מינימלית יוכל לשוב לקדמותו. למרבה הצער, תולדות כדור הארץ אינם מאששים אמונה זו. המעבר מעולם בר-קיימא לעולם בלתי נושב יכול להיות מהיר ובלתי הפיך.

מי שמבקש המחשה טראגית לאפשרות כזו, הגם במיקרוקוסמוס של אי בודד באוקיאנוס השקט, מוזמן לבקר באי הפסחא¹² [איור 14]

מקראה

1. Lovelock, James, (1995) *"The Ages of Gaia: A Biography of Our Living Earth"* , W.W.Norton & Co.
 2. William Erwin Thompson (ed.) (1987) *"GAIA: A Way of Knowing"* ch.5: Lynn Margulis, "Early Life" Lindisfarne Press
 3. Lenton, TM; Lovelock, JE (2000). *"Daisyworld is Darwinian: Constraints on adaptation are important for planetary self-regulation"*. *Journal of theoretical biology* **206** (1): 109–14.
 4. NASA: Regenerative Life Support for Space Settlers
www.settlement.arc.nasa.gov/designer/regen.html
 5. *Biosphere 2: The Experiment*
www.biospherics.org/experimentchrono1.html
 6. Allen, John P. (2009). *Me and the Biospheres: A Memoir by the Inventor of Biosphere 2*. Synergetic Press.
[ISBN 978-0-907791-37-9](http://www.amazon.com/dp/978-0-907791-37-9).
 7. Donella H. Meadows, Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, and William W. Behrens III. (1972).
The Limits to Growth. New York: Universe Books
 8. Donella H. Meadows, Jorgen Randers and Dennis L. Meadows (2004) *Limits to Growth: The 30-Year Update*
Chelsea Green Publishing
 9. James Lovelock (2006) *The Revenge of Gaia: Why the Earth is Fighting Back - and How we Can Still Save Humanity* , Basic Books
 10. Herbert Simon, (1996) *The Sciences of the Artificial* (3rd edition), MIT Press
 11. www.inhabitat.com/building-modelled-on-termites-eastgate-centre-in-zimbabwe
 12. www.lost-civilizations.net/easter-island-stones-history.html
13. תולדות העולם ב-2 דקות: <http://manneli.com/movies/Nature/Our%20Story%20In%202%20Minutes.htm>