



ניצול אנרגיות חלופיות

לאור המשבר במפרץ הפרסי

עורך: פרופ' א. בורקט

מוסד שמואל נאמן * משרד האנרגיה והתשתית

מוסד שמואל נאמן * משרד האנרגיה והתשתית

**ניצול אנרגיות חלופיות
לאור המשבר במפרץ הפרסי**

עורך: פרופ' א. בורקט

אוגוסט 1991

ניצול אנרגיות חלופיות לאור המשבר במפרץ הפרסי

עורך: פרופ' א. בורקט

הדעות בפרסום זה אינן משקפות בהכרח את עמדתו של מוסד ש. נאמן.

Copyright ©, 1991. The Samuel Neaman Institute
for Advanced Studies in Science and Technology

פורסם אוגוסט 1991
מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם
קרית הטכניון, חיפה 32000

דבר העורך

פרופ' אלכסנדר בורקט

הפקולטה להנדסת אוירונטיקה וחלל - הטכניון, חיפה

נתבקשתי ע"י מוסד נאמן לארגן את הכנס על אנרגיות חלופיות לאור המשבר במפרץ הפרסי. כנס זה אורגן בשיתוף פעולה הדוק עם פרופ' דניאל ויס, מנהל המכון, ודר' דוד כהן, וכמו כן עם דר' הרברט ארביב, נציג משרד האנרגיה והתשתית.

הכנס כוון מלכתחילה למקבלי החלטות במגזר המשקי והכלכלי כדי לספק מידע עדכני ומפורט על הנעשה בעולם ובעיקר בארץ בתחום האנרגיה החלופית. לכן נסינו לתת כיסוי נרחב ככל האפשר של כל התחומים האפשריים של אנרגיות חלופיות, כאשר מחד הסקירות ינתנו ע"י המומחים החשובים ביותר בשטח זה, ומאידך ההרצאות תנתנה ללא פירוט מדעי וטכני מיותר החשוב למומחים הספציפיים בשטח, אך נוטה לערפל את הנושא למי שאינו בקי בכל רזי המקצועות השונים.

התמקדנו על מספר הרצאות ראשיות ועל פנל דיון שבמסגרתו ניתנו סקירות קצרות יותר וגם התקיים ויכוח בין המשתתפים.

בין ההרצאות הראשיות כללנו את אנרגית השמש, הרצאה שניתנה ע"י פרופסור דוסטורובסקי, ראש המעבדה לאנרגית השמש במכון ויצמן למדע, האנרגיה הגרעינית שניתנה ע"י מר אמנון עינב, המדען הראשי של משרד האנרגיה והתשתית, על השימוש בפצלי שמן כדלק חילופי, מפי מר אברהם קיזר, מנכ"ל פמ"א, ועל אפשרויות חיסכון באנרגיה בבניה, הרצאה שהתחלקה בין פרופ' מיכאל פורה מהפקולטה להנדסת בנין, ופרופ' עדנה שביט מהפקולטה לארכיטקטורה שדיברה על תכנון הבית הסולרי הפסיבי.

בפנל שנוהל ע"י פרופ' גד חירוני מהפקולטה להנדסת מכונות בטכניון, השתתפו דר' אורי פיישר שסקר את פעילותה של חברת אורמת בתחום האנרגיה החלופית, מר יואל גלאון, שסקר את פעילותה של חברת לוז בנושא יצור חשמל מאנרגית שמש, דר' איתן יניר מחברת פז שסקר את פעילותה של חברת פז בנושא אנרגיות חלופיות, ואינג'נר יגאל פורת מחברת החשמל שסקר את מעורבותה של חברת החשמל בשימוש באנרגיות חלופיות. פרופ' אביב רוזן מהפקולטה להנדסת אוירונטיקה חלל סקר את השימוש באנרגית הרוח בעולם ובארץ וסיים פרופ' גדליה שלף מהפקולטה להנדסה אזרחית שסקר יצור אנרגיה מביומסה. כל המרצים נענו לבקשתי להציג את הרצאותיהם כך שתהיינה מכוונות לספק מידע בסיסי למקבלי החלטות במשק, ועמדו היטב במשימתם. על כך נתונה להם תודתי.

חוברת זו נערכה בעיקרה על פי תעתיק ההרצאות והדיונים שנשאו המשתתפים בזמן הכנס. אם חלו שיבושים במסירת דברי המשתתפים, יזקפו אלה לא לחובת המרצים והמשתתפים בכינוס אלא לחובתי בלבד. כל החומר הגרפי, הדיאגרמות המספרים והטבלאות בחוברת זו הוצגו באופן מקורי ע"י המשתתפים בהרצאותיהם.

ולבסוף יבואו על הברכה כל הצוות הטכני של מוסד נאמן שאיפשרו הכנת הכנס, והוצאת החוברת לאור. לכולם תודה.

יוני 1991.

תוכן הענינים

- I..... פרופ' אלכסנדר בורקט דבר העורך -
- II..... תוכן הענינים -
- 1..... פרופ' דניאל ויס, מנהל מוסד נאמן דברי פתיחה -
- 3..... פרופ' זאב תדמור, נשיא הטכניון ברכת הנשיא -
- 5..... פרופ' ישראל דוסטובסקי אנרגית שמש כאנרגיה חלופית -
- אנרגיה גרעינית כאנרגיה חלופית -
- 15..... אמנון ענב, המדען הראשי משרד האנרגיה המדען הראשי משרד האנרגיה
- 33..... פצלי שמן כדלק חלופי - אברהם קיזר, מנכ"ל פמ"א
- 41..... חסכון באנרגיה בבנייני מגורים - פרופ' מיכאל פורת
- 43..... תכנון אדריכלי מודע לאנרגיה - פרופ' עדנה שביב
- שולחן עגול על אנרגיות חלופיות בהנחיית פרופ' גד חצרוני
- ישומים של אנרגיות חלופיות ע"י חברת אורמת -
- 57..... דר' אורי פישר, חברת אורמת בע"מ
- 65..... ישומים באנרגיה סולרית - יואל גילון, לוז תעשיות בע"מ
- מעורבות חברת החשמל לישראל באנרגיה חלופית -
- 67..... יגאל פורת, מנהל מחקר ופיתוח חברת החשמל לישראל
- מעורבות חברת פז בניצול אנרגיות חלופיות -
- 69..... דר' איתן יניר - מנהל מחלקת פיתוח עסקים פז בע"מ
- 73..... אנרגית הרוח - פרופ' אביב רוזן
- 77..... אנרגיה מביומסה - פרופ' גדליה שלף
- 83..... דברי סיום - דר' אברהם ארביב, משרד האנרגיה והתשתית

דברי פתיחה

פרופ' דניאל ויס

מנהל מוסד ש. נאמן - הטכניון

נשיא הטכניון, משתתפי כנס נכבדים.

בשם מוסד נאמן שיזם את הכנס הזה, ומשרד האנרגיה והתשתית, אני מתכבד לפתוח את הכינוס, אם כי באיחור של ארבעה חודשים, כפי שאתם יודעים. כאשר תכננו לראשונה את הכינוס הזה, באוקטובר 1990, עדיין היה מתח בנושא כיבוש כווית, ולכן קראנו לכינוס ניצול אנרגיות חלופיות לאור המשבר במפרץ הפרסי. היו אז חששות של מחנק באספקת הנפט העולמית, ונראה היה לנו שיש מקום לחדש את הדיון במקורות אנרגיה חלופיים.

כידוע, בימים כתיקונם, אופ'ק דואג לכך שמקורות אנרגיה חלופיים לא יהיה בהם ענין כלכלי רב מדי ע"י זה שהוא שומר את מחירי הנפט כך שהם תמיד תחרותיים. אבל, בעתות משבר כמו שהיה ב-1973 ואח"כ ב-1979 ושוב בשנה שעברה הרסן מתרופפת קצת, ואז כולנו רואים שבעצם אנו תלויים בצינור הטבור אל הנפט, ורצוי להסתכל באנרגיות חלופיות גם מעבר לשיקולים כלכליים.

בינתיים נדחה הכנס ואני חושב שדוקא עכשיו זה עתוי עוד יותר טוב, כי שוב מחירי הנפט התחילו לרדת בחזרה, ויש חשש שאנחנו שוב נכנס למן אשליה כזאת ששוב אין בעיה. לכן דוקא כן כדאי להסתכל על מקורות אנרגיה חלופיים ובמיוחד על משמעותם בארץ. אני חושב שזה דוקא סימלי שאנחנו עורכים כנס זה בליג בעומר, שבו אנחנו בעצם חוגגים בעזרת מקור האנרגיה החלופי הראשון לנפט, שזה עצים.

אציג בקצרה מהו מוסד נאמן. מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה, הוא מדוכת החשיבה (Think-Tank) של הטכניון. זהו גוף שעוסק בנייתוחי מחקרים אינטר-דיסציפלינריים שמטרתם העיקרית היא לתת למקבלי החלטות במגזרים השונים, המגזר המשקי, הממשלתי וכדומה, חלופות מחושבות לבעיות שעליהן הם צריכים להחליט. כלומר, לחשוב, ולנסות לאתר מראש תחומים בעיתיים ולנסות לספק ניתוחים המבוססים על עקרונות מדעיים, לבעיות שעלולות להתעורר.

התחומים הם כמובן, בגלל שאנו ממוקמים בטכניון, בעיקר בשטח של מדע וטכנולוגיה, אבל אנחנו עוסקים גם בתחומי חברה וכדומה. למשל, אנחנו עוסקים בתחומים בעזרת משרדי ממשלה שונים, עם משרד האנרגיה והתשתית, לדוגמה ארגנו את הכינוס הזה. עם משרד המדע למשל אנחנו עוסקים מספר סקרים על תחומי הרמה המדעית בארץ, ההשפעה של המדע הישראלי בעולם, על הפער הטכנולוגי בין ישראל לארצות ערב. באופן כללי אנחנו מנהלים כ-20 מחקרים עם 60 חוקרים, מהם 40 אנשי הטכניון, ואחרים, מגופים שונים החל מיועצים פרטיים דרך אנשים מאוניברסיטאות שונות. התקציב הכולל הוא בערך 700 אלף דולר לשנה, שכחצי מזה בא מקרן פנימית שמאפשרת עצמאות.

מאחר ואני יודע שכולנו רוצים לשמוע על אנרגיות חלופיות, אקצר כאן ואאחל לכולנו יום מענין, מועיל ומהנה. תודה רבה.

ברכת נשיא הטכניון

פרופ' זאב תדמור

נשיא הטכניון, מכון טכנולוגי לישראל

פרופ' ויס, מר תנחום גריזים מנכ"ל משרד המדע, קהל נכבד.

למרות עודף ההיצע בנפט בשנים האחרונות והמחירים הנמוכים בשווקים הבין לאומיים, בעית מקורות האנרגיה החלופית, נטולת השפעה מזיקה לסביבה, נשארת בעיה מרכזית של האנושות וכמובן של ישראל. המשבר והמלחמה במפרץ הפרסי, יכולים רק לשמש תזכורת לחשיבות הנושא, לרגישות העולם המפותח לנושא, ולנכונות לצאת אפילו למלחמה, כאשר מדובר על מקורות האנרגיה וההגנה עליהם, ולצאת למלחמה בעידן הזה משמעותי מאד.

על כן הענין במקורות חלופיים כמו תחנות כוח גרעיניות בטוחות, וכמובן חיפוש דרכים ושכלול ניצול אנרגית השמש, חוזרים למרכז תשומת הלב של הפעילות המדעית והטכנולוגית. אני חושב שמגמות אלו רק יתחזקו בעתיד, ואצלנו שוב מדברים על תחנת כח גרעינית כחול לבן, שעל רקע כח האדם המקצועי הרב שמגיע עם העליה, הופכת לאלטרנטיבה אולי יותר סבירה.

סדנה זאת ע"י מוסד נאמן, באה בעתוי מושלם. מוסד שמואל נאמן למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה, הוא אכן מדוכת חשיבה של הטכניון. ואגב את השם מדוכת חשיבה כתרגום עברי למונח Think-Tank, הגשנו לאקדמיה ללשון העברית כהצעה. יתכן מאד, שעוד כמה שנים זה יתקבל כשם רשמי. ההצעה אגב, הוצעה ע"י סם נאמן עצמו.

המוסד, מוסד נאמן, ממלא אחרי אחת מתעודות הטכניון החשובות, של יעוץ לחברה, לממשל ולמשק, בנושאים לאומיים העומדים על הפרק. למרות שלא תמיד העצות מתקבלות, חשוב מאד לשים על שולחן הדיונים הלאומי תוצאות מחקרי מדיניות בנושא המדע והטכנולוגיה, וזה אכן הכיוון שהמוסד מתרכז בו ולהציע חלופות פתרון בדוקות ומבוססות. למוסד נאמן, שהיה לי הכבוד לנהל אותו מספר שנים עד כניסתי לתפקיד הנוכחי, תכנית מקיפה, ודני הזכיר אותה קצת, שחלופות האנרגיה הוא מחקר אחד ממנו, והמוסד עסק כפי שידוע לכם גם בעבר, עוד הרבה לפני שאני הייתי מעורב בו, בנושא מדיניות אנרגיה לאומית, ותרם כבר תרומה בנושא הזה למדינה.

בשם הטכניון אני רוצה להודות למוסד נאמן על ארגון הסדנה הזאת, ואני מבקש לאחל לכם דיונים פוריים, ואני מקווה שכמסורת המוסד, יהיו סדנאות רבות כאלה בנושאים לאומיים בעלי חשיבות. תודה רבה.

אנרגית שמש כאנרגיה חלופית

פרופ' ישראל דוסטובסקי
מכון ויצמן למדע, רחובות

רציתי לתת תמונת מצב על נושא אנרגיות חלופיות בכלל ואנרגית שמש בפרט. עד לפני עשר שנים הדחף העיקרי לעבודה באנרגיות חלופיות נבע מההכרה או מההערכה שהאנרגיות הפוסיליות [שמקורן במרבצים ביולוגיים], שהן מקור האנרגיה העיקרי של האנושות היום, הוא מאגר סופי שיאזל באחד הימים. לכן האנרגיה החלופית זה נושא שיש לעסוק בו, אבל לא בעדיפות גבוהה. ההשקעות העולמיות בנושא זה משקפות את ההרגשה שאם משווים את המספרים העולמיים שהושקעו באנרגיה גרעינית בהשוואה לכל מה שהושקע בעולם באנרגיות חלופיות, זה פאקטור של אחד ל-100 אלף ואין להתפלא, על כן, שקצב ההתקדמות הוא אטי, מתוך השקול שזה לא בוער.

בשנים האחרונות נוסף עוד דחף חדש לנושא, והוא הנושא הסביבתי. בערך לפני עשר שנים, התחילו להופיע תוצאות מחקרים שהאמריקאים יזמו, על ההשפעות הסביבתיות של שימוש נמשך בדלקים פסיביים, ונולד המושג של אפקט חממה, שנבע מפליטה של מוצרי בעירה. זה כבר משהו שלוח הזמנים שלו שונה לגמרי, משהו שקורה היום ולא בעוד מאה שנה. כל יום שמכניסים כמות נוספת של דו תחמוצת הפחמן לאטמוספירה, עושים משהו שאינו רברסיבילי בלוח הזמנים של האנושות, ולכן העדיפות השתנתה. היום המצב שהלחץ לפיתוח אנרגיות חלופיות מתחלק, חצי מהדחף למצוא חלופות לדלק פוסילי שנובע מהסופיות של המאגרים, וחציו משיקולים של אפקט הסביבה.

בימים אלה מתקיים במכון ויצמן כנס בינלאומי שנועד לברר האם מצב הידע בעולם כבר התקדם מספיק, שנוכל להסיק מסקנות מה תהיה המשמעות, או מה תהיינה השפעות של שינויי האקלים העולמיים על ארץ ישראל. זה נושא סבוך וקשה. מצב מדינת ישראל הוא מיוחד. אנו לא רק חשופים לבעיה העולמית הכללית, אלא קיימים לגבינו שיקולים גיאופוליטיים לא ידידותיים, ולכן אנו יותר ערים מאומות אחרות לנושא האנרגיות החלופיות, לא רק מבחינת סופיות המאגרים אלא מבחינת אמינות אספקת האנרגיה למדינת ישראל.

כנראה שהעולם החליט ששיקולים גיאופוליטיים קל יותר לפתור במלחמה מאשר בדרכים טכנולוגיות. מפני שבסופו של דבר מלחמה זה פיתוח טכנולוגיה, והאמריקאים גאים שניצחו במלחמת המפרץ על ידי פיתוח טכנולוגי, ולכן הברירה שעומדת בפני הרבה אומות היא לפתח טכנולוגיה הטובה למלחמה ושיכולה אולי למנוע מלחמה. אני כמעט בטוח שאילו היו חלופות אמינות, היה הדחף למלחמה קטן.

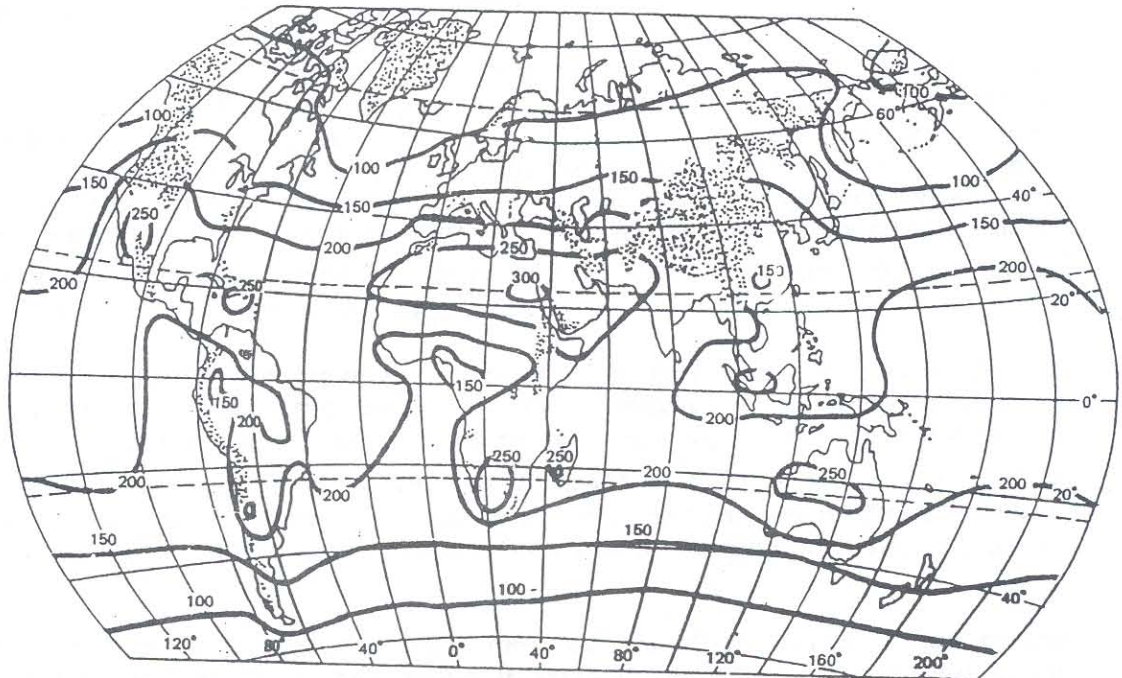
הייתי רוצה לתת סקירה סוביקטיבית של המצב בארץ ובעולם, כדי שתוכלו לשקול אם המשימה של פיתוח טכנולוגיות חלופיות היא כל כך גדולה ועדיפה על מלחמות.

מקורות אנרגיה מתחדשים בעולם

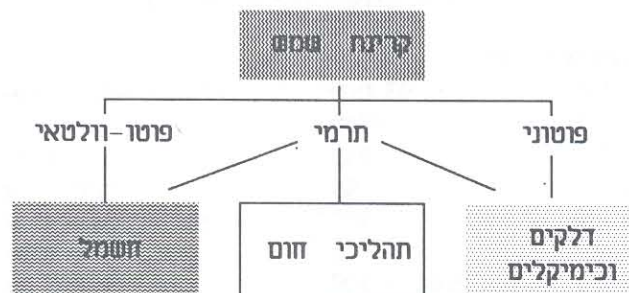
זמן התחדשות בימים	EJ	
265	93,000	אנרגית שמש (ישירה)
11	4000	רוח
0.6	210	ביומסה
0.25	90	מפלי מים
0.28	100	אנרגיה גיאותרמית
-	1	אנרגית גלים
6 מיליון שנים	2000×10^6	אנרגיה גרעינית

בטבלה רשומות רוב האנרגיות החלופיות, האנרגיות הלא פוסיליות ואנרגיות מתחדשות, כלומר שאינן אוזלות, פרט אולי לגרעין שזו לא בדיוק אנרגיה מתחדשת אבל הכמות היא כה גדולה, שניתן להתיחס לגביה כאל משהו לא אזיל. מספרים אלה הם הפוטנציאל השנתי של אנרגיה מתחדשת, ביחידות של 10^{18} EJ, כדי לתת מושג - תצרוכת האנרגיה העולמית השנתית היא כ-300 יחידות כאלה.

לגבי מדינת ישראל, אנו יכולים למחוק את גאות הים, ולצערנו, אין לנו הרבה גיאותרמיה, ומעט אנרגיה הידרודינמית, וביומסה. יש לנו קצת רוח, והרבה שמש. גרעין זה נושא אחר. בהמשך דברי אתרכז, לכן, באנרגית שמש. בצירור להלן יש מפה של התפלגות ממוצעת של קרינת השמש על פני כדור הארץ, ביחידות של W/m^2 ואלה קוי הקרינה. הצבע הכהה מתאר מכסימום. כל מה שמעל 200 ואט למ"ר (ממוצע ל-24 שעות) זה שמיש ויש להביאו בחשבון.



המקומות בהם אנרגית השמש היא מקסימלית מתלכדים עם מדבריות. יש מדבריות בדרום מערב ארה"ב, צפון אפריקה, דרום אפריקה חצי האי ערב ואוסטרליה. האזורים הכהים נתנו את המספר שרואים בטבלה, ז"א הטבלה מתארת את סיכום האנרגיה הנופלת על מקומות אלה. כאן רואים שרק חלק קטן מהאנרגיה שנופלת על המדבריות מספיקה כדי לספק את צרכי האנושות, ולכן זה אתגר חשוב. אם יש הרבה שמש, והיא מצויה, למה לא משתמשים בה עד היום? בהמשך אציג את נקודות התורפה, שאם יימצא להן פתרון, אנרגית השמש תהיה משהו שאפשר יהיה באמת לנצל.



אפשר לנתח את השימוש באנרגיית השמש בדרך הבאה: יש לנו שלושה כיוונים עיקריים בהם אפשר ללכת. אפשר ליצור חשמל ישר מאנרגיית שמש, אפשר לקחת את הפוטונים ולהפוך אותם לחום ומהחום ליצור חשמל, או להפוך את הפוטונים לכימיה, לדלקים וחומרים. בהמשך הדברים אתרכז בדרך השניה אבל אזכיר במספר מלים גם את האחרות.

התהליך הפתו-וולטאי הוא היום זי מפותח, אמין אך יקר משום שמשתמשים בטכנולוגיה של חצאי מוליכים. התהליך טוב לשימושים מיוחדים, כגון בחלל. גם פה קיים מאזן בין עלות האלמנט הפוטו-וולטאי והיעילות שלו. היעילות הטובה ביותר שהגיעו במעבדה היא 30% קוונורסיה. באופן מסחרי זה 5%, וישנן מערכות פוטו-וולטאיות שהן יותר זולות ויותר מועילות. כרגע הפיתוח הוא למצוא את האיזון בין העלות והיעילות מבחינת הקוונורסיה של פוטונים לחשמל.

השיטה השלישית היא הפיכה של פוטונים לכימיה. זה התהליך שהטבע פיתח, כל החיים על פני כדור הארץ תלויים בתהליך זה - פוטוסינתזה. במעבדה פוטוסינתזה היא תהליך ידוע. באופן מסחרי זה תהליך יקר מדי ובעל יעילות קטנה, ולכן לא משתמשים בו הרבה.

הנושא המרכזי הם התהליכים בהם הופכים את אנרגיית השמש והפוטונים לחום. מחום אפשר לעשות כל מיני דברים, ניתן להשתמש בו כחום תהליך, לייצר קיטור או להפוך אותו לחשמל, או על ידי ריאקציות כימיות להפכו לאנרגיה כימית. זה פתח למגוון גדול של שימושים. ברצוני לסקור זאת מבחינת מאזן יעילות כנגד עלות.

כדי להפוך אנרגיית שמש לכל דבר אחר, יש צורך, ראשית, לאסוף אותה. כיוון שאנרגיית השמש היא מהולה, כלומר כמות האנרגיה למ"ר על פני כדור הארץ היא קטנה, בימים טובים זה מגיע בקושי ל-900 וואט למ"ר. לכן אנו צריכים שטחים גדולים דבר הקובע את העלות. אי-לכך יש לחפש תהליכים בהם עלות האיסוף היא נמוכה. ידוע מתרמודינמיקה שככל שהטמפרטורה של מקור החום גבוהה יותר, היעילות גבוהה יותר. הייתי רוצה להדגיש עוד שני קשיים חמורים באנרגיית השמש המפריעים לניצולה בקנה מידה גדול.

נקודה אחת היא העובדה שהשמש אינה זורחת במשך 24 שעות. לכן אם מתכוונים להגיע לניצול גבוה של אנרגיית שמש יש לפתור את בעיית האגירה, כי אי אפשר לספק אנרגיה רק כשהשמש זורחת.

נקודה נוספת היא שיש הרבה מדבריות, אבל המקומות בהם יש דרישה לאנרגיית שמש אינם מדבריים. אם נצליח לאסוף את אנרגיית השמש ביעילות במדבריות, יש למצוא דרכים להעבירה ביעילות למקומות בהם אנשים זקוקים לאנרגיה. יש להמיר את אנרגיית השמש לצורת אנרגיה הניתנת להעברה בנוחיות ובזול ובטכנולוגיות עד כמה שאפשר מקובלות וידועות.

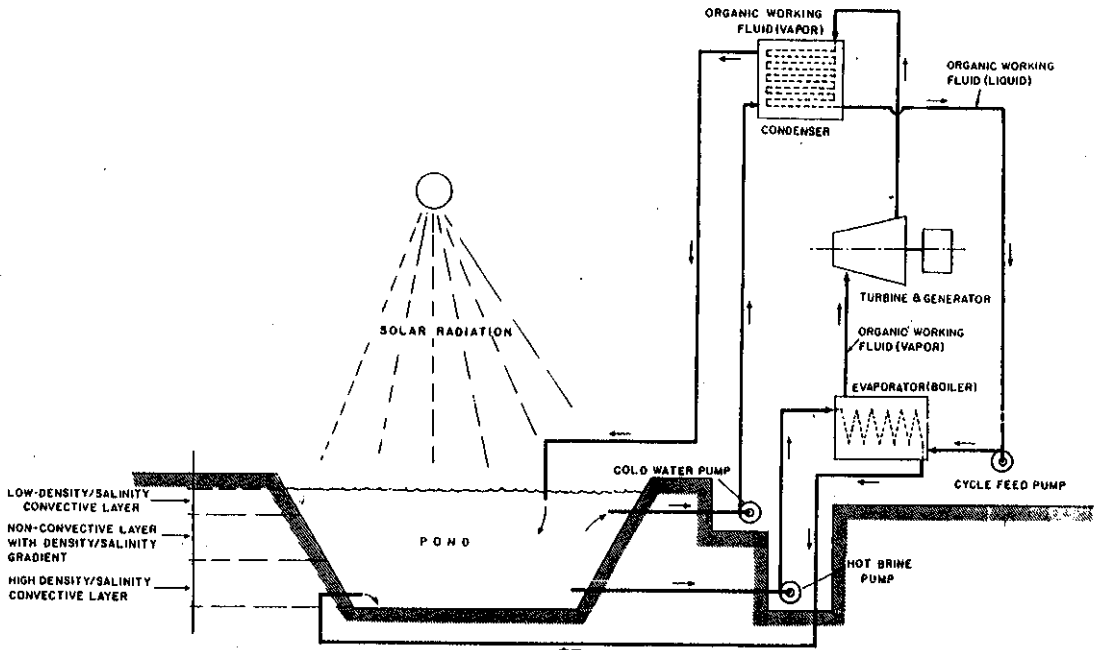
שלוש המשימות של ניצול אנרגיית שמש הן:

- א. למצוא דרכים זולות לאיסוף, בהתחשב ביעילות.
 - ב. למצוא פתרון לבעיית האגירה.
 - ג. למצוא פתרון לבעיית העברת האנרגיה למרחקים.
- הפתרונות יוצגו בסדר עולה של טמפרטורות.

הדרך הזולה ביותר לאיסוף אנרגיית שמש היא לא לרכז אותה אלא לקלוט אותה כפי שקולטים בגגות. זה נותן מאגר בטמפרטורה של 70 מעלות, מספיק בשביל מקלחת אבל לא בשביל לייצר כוח.

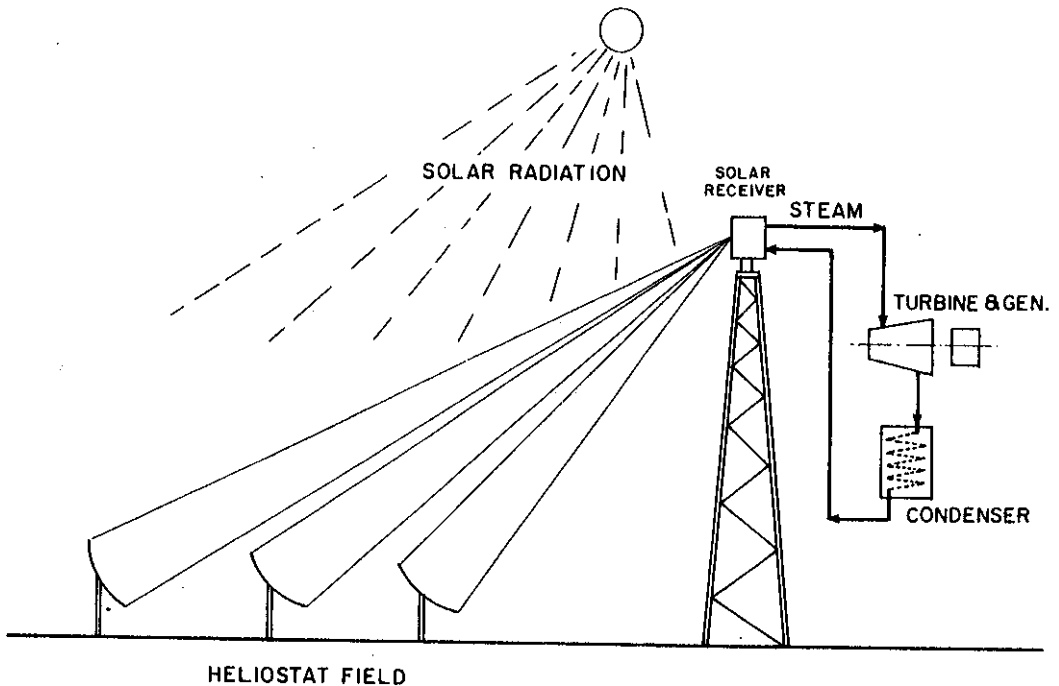
בקטגוריה הזו של טמפרטורות נמוכות יש להזכיר את הבריכות הסולריות. הבריכה הסולרית היא דרך שחשבו שהיא הזולה ביותר לאסוף אנרגיית שמש לא מרוכזת, היא נותנת

טמפרטורות עבודה מתחת למאה מעלות ולכן הנצילות נמוכה. יש פה דוגמא ראשונה של מאזן. יש לנו דרך שנחשבת לזולה ליישום, יעילות כנגד עלות נמוכה, נותנת נתון שהוא לא הכי אופטימי בעולם. (ראה ציור).



SCHEMATIC DIAGRAM OF A SOLAR POND POWER PLANT

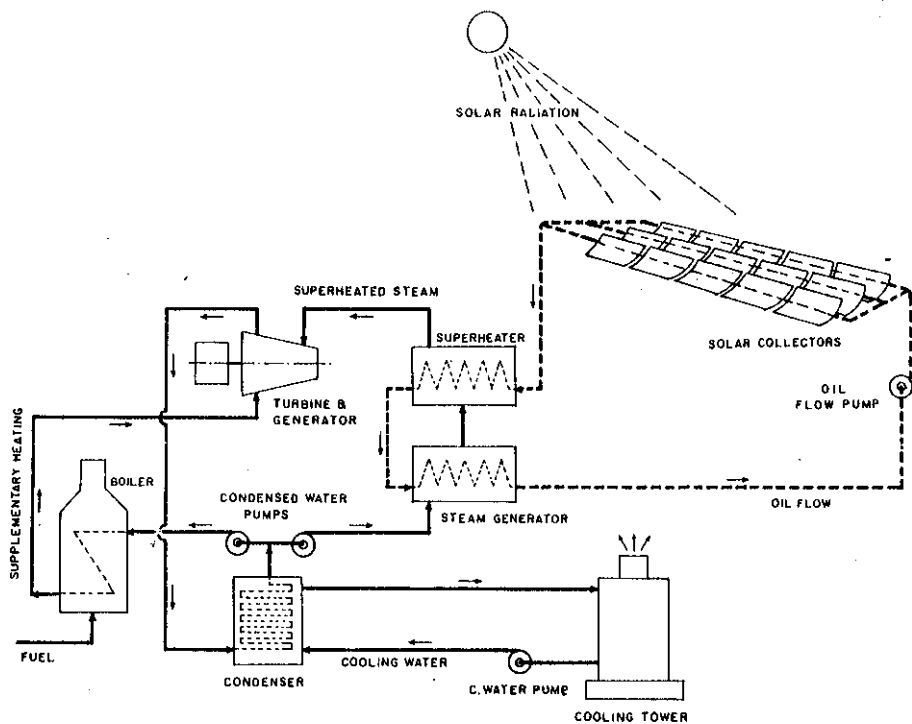
אם נעלה בסקלת הטמפרטורות נגיע לאזור בו צריך לרכז את אנרגיית השמש. אם נרצה לעבור את גבול המאה מעלות יש תהליכים לריכוז. התהליכים המקובלים נעשים בדרך כלל על ידי מראות, החזרת שמש ממראות, ולפי זרמת התחכום של המראות ניתן לקבוע את



SCHEMATIC DIAGRAM OF CENTRAL SOLAR RECEIVER

טמפרטורת העבודה. הנושא נעשה קצת יותר מסובך מכיון שברגע שנעשה מאמץ להגיע לריכוזים גבוהים, ויש לנו שטחים גדולים של מראות, המאמץ להגדיל את הריכוז הוא כבר קטן יחסית. לכן כשמרכזים שמש, יש מוטיבציה להגיע לריכוזים גבוהים, מכיון שבהשקעה נוספת יחסית קטנה, אנו מגדילים את הניצולת התרמודינמית פי כמה. ולכן הסטורית הפיתוחים בשטח זה מתיחסת לאיזון בין ההשקעה כנגד הניצול התרמודינמי של הטמפרטורות הגבוהות.

הדוגמה הראשונה, מסיבות פטריוטיות, היא חברת לוז. הריכוז בבריכות שלהם נעשה על ידי מראות פרבוליות, הפוקוס הוא קווי וזה מכתיב את זרגת הריכוז ואוטומטית את טמפרטורת העבודה והיעילות התרמודינמית. כל הדברים האלה נקבעו ברגע שנבחרה השיטה לריכוז. בציור נראה את הדיאגרמה של תהליך לוז. תהליך זה מספק את הכמות הגדולה ביותר של אנרגיה שמש בעולם, בקליפורניה. זה שיא עולמי וזו טכנולוגיה מוכחת, שיש לה מגבלות הנובעות בעיקר מהעובדה שהריכוז הוא קווי ולכן נותן טמפרטורה מקסימלית בין 300 ל-400 מעלות. כאן שטח הזכוכית הוא גדול. ניתן לסדר אותו שטח בקונפיגורציות אחרות, והצורה הנותנת ריכוז גדול ביותר היא קונפיגורציה של ריכוז נקודתי. זה מביא אותנו למראות דמויות צלחת.



THE LUZ SYSTEM - SEGS III

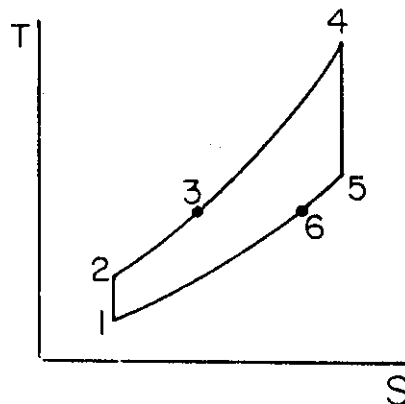
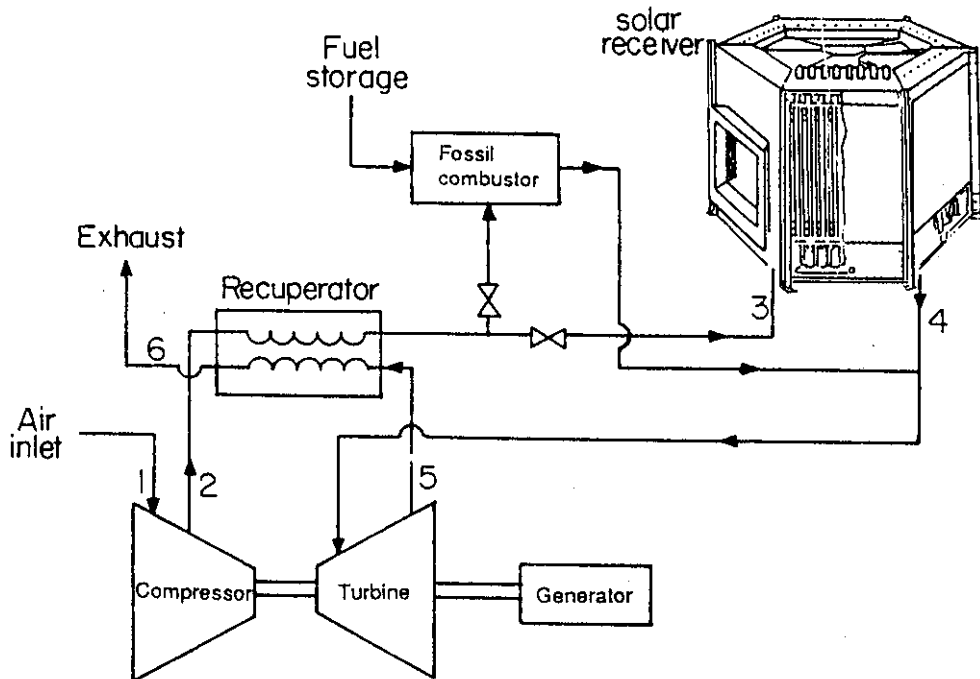
בקצה התהליך, במקום צלחת אחת גדולה, שיש מגבלות פרקטיות לבנות אותה, אם רוצים כמה אלפי מ"ר של שטח מחזיר זה קשה לביצוע בצלחת אחת. מחלקים לכמה צלחות המרכזות את האור לנקודה אחת, שהיא המגדל הסולרי הידוע, כפי שקיים במכון ויצמן. כאן מדובר במשטחים יותר גדולים, למשל המתקן במכון ויצמן נותן ריכוז פי 3000, וטמפרטורות עבודה מעל 1000 מעלות, בהספקים התלויים רק במספר המראות הרצוי. זה לא בדיוק קצה הטכנולוגיה, אבל קרוב לקצה טכנולוגית האיסוף. אנו מגיעים כאן לחסם אחר לגמרי, בזה שמגיעים לטמפרטורות בגבול הידע הטכנולוגי. כשעובדים בטמפרטורות של מעל 2000 מעלות, נוצרת בעית חומרים רצינית.

מתקן כפי שמופיע בציור, המרתיה מים, נבנה על ידי האמריקאים, ונסגר כיון שלא היה כלכלי בקנה מידה של 10 מגוואט. אין כרגע מתקן גדול העובד בשיטה זו. היה מתקן בצרפת של 2 מגוואט, שעבד לא במאגר של הרתחת מים, אלא במאגר של מלח מותך שנחשב עד היום לדרך הטובה ביותר. גם מתקן זה עבד כמה שנים ונסגר. 2 מגוואט זה קטן מדי. כרגע נמצא בתכנון מתקדם בארה"ב מתקן של 30 מגוואט המבוסס על מלח מותך. עדיין חסר המימון להתחלת הבניה. בספרד היה מתקן של חצי מגוואט שעבד על נתן נוזלי ולבסוף נשרף.

הזחף לפיתוחים אלה נובע מהרצון להגיע למאגרי חום גדולים מאד ליחידת שטח. מה שקורה, מקבלים כאן ריכוזים גבוהים של אנרגיה שמש או חום, וצריך למצוא דרך להכניס את השטח הגדול הזה למעגל הסרמי בצורה יעילה. רוצים להגיע למצב בו נוכל להחזיר 2000 קילוואט למ"ר לאיזשהו נוזל או גז.

אני רוצה לתאר כמה מהדברים שעדיין לא נעשו או נמצאים בעבודה, בעיקר אבל לא רק אצלנו, כדי לפתור את הבעיות שהזכרנו. יש בעיות יעילות, להגדיל את היעילות כדי לשלם את הוצאות הריכוז, יש בעית אגירת האנרגיה ובעיה של העברתה למרחקים.

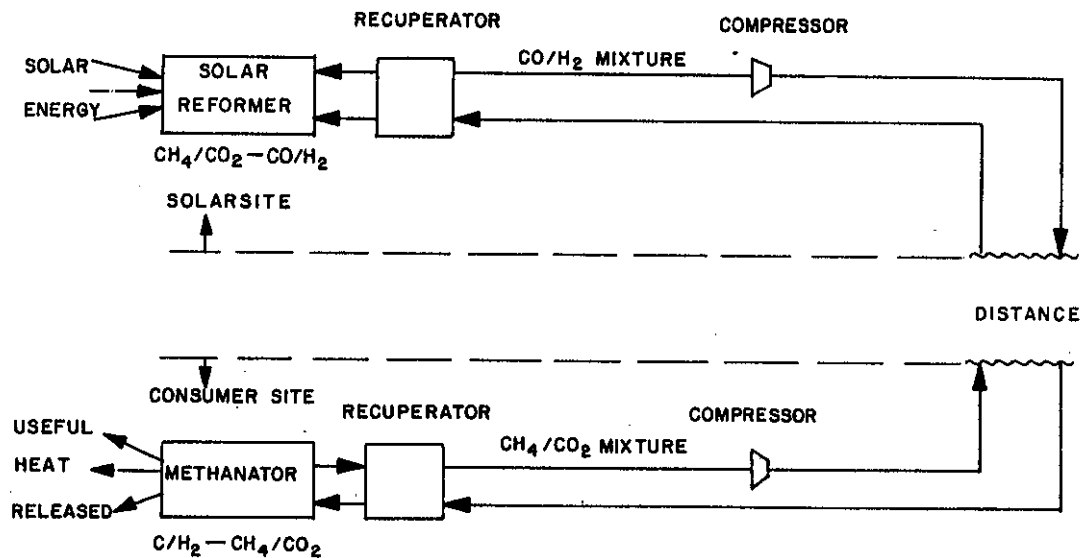
אם רוצים להגיע לטמפרטורות גבוהות, צריכים למצוא מעגלים תרמודינמיים שונים מהמעגל הרגיל המוגבל ל-550 מעלות, בו משתמשים כיום. נמצא בפיתוח תהליך של טורבינת גז

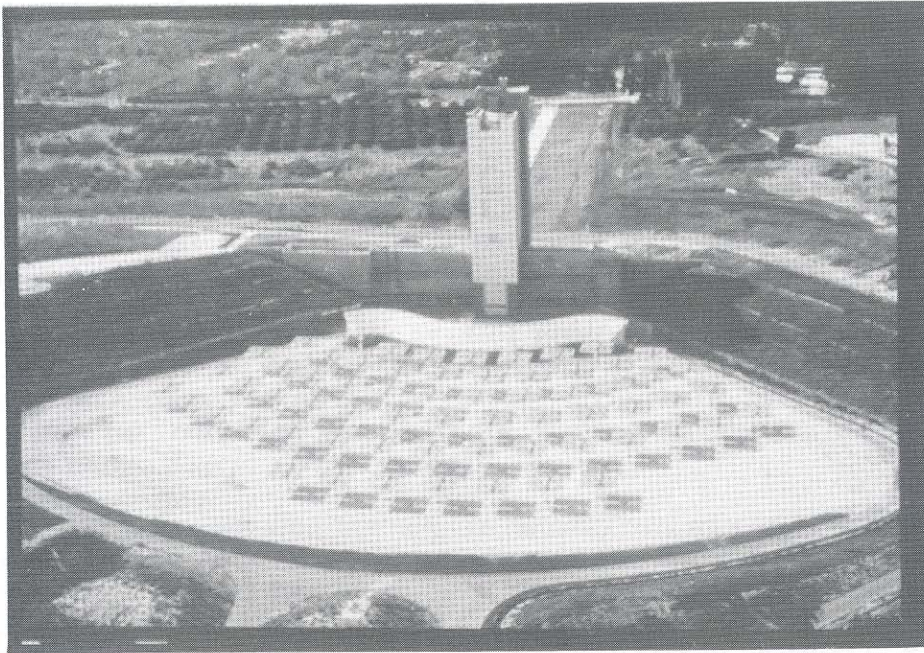


(מעגל ברייטון) בו לוקחים נוזל שהוא אוויר, מחומם לטמפרטורה גבוהה, ונותנים לו להתפשט דרך טורבינות. מעגל זה הוא טוב ביותר מבחינה סביבתית, אינו צורך דלק, ואינו פולט שום דבר לאוויר. אם מצליחים לעבוד בטמפרטורה גבוהה, אפשר להגיע ליעילויות גבוהות. פותחו כבר היום או נמצאים בפיתוח טורבינות גז עם להבים קרמיים שיכולים לעבוד ב-1350 מעלות צלזיוס. זה פיתוח יפני ופיתוח גרמני, עם יעילויות תרמודינמיות של מעל 50 אחוז. הבעיה היא איך לחמם אוויר לטמפרטורות אלה, כדי שנוכל להזרים אותו לטורבינת גז. זו הבעיה הקשה ביותר. לחמם אוויר זה לא דבר טריוויאלי. אוויר הוא שקוף, כך שלא משנה כמה מרכזים את אנרגיית השמש הוא עובר דרך אוויר והאוויר נשאר קר. כרגע קיים במכון ויצמן ניסוי של טורבינת גז לא ב-1300 אלא ב-1000 מעלות, כי אנחנו לא יודעים לחמם אוויר. המגבלה היא לא הטורבינה אלא חימום האוויר. כרגע יש לנו מחמם אוויר שיוזע לחמם אוויר בלחץ של 8-10 אטמוספירות, ל-1000 מעלות. הבעיות אינן טריביאליות. זה עוד לא נעשה בעולם. אם זה יעבוד, נוכל להעלות את טמפרטורת האוויר ולהצמיד אותה לטמפרטורה הנדרשת על ידי הטורבינה. יהיה לנו מעגל יעיל בפקטור של 2 או 3 יותר מכל מעגל אחר שיש לנו להמרת שמש בחשמל, ואז כל השיקולים שאמרתם משתנים, כי העלות תפוצה בהוצאות הריכוז.

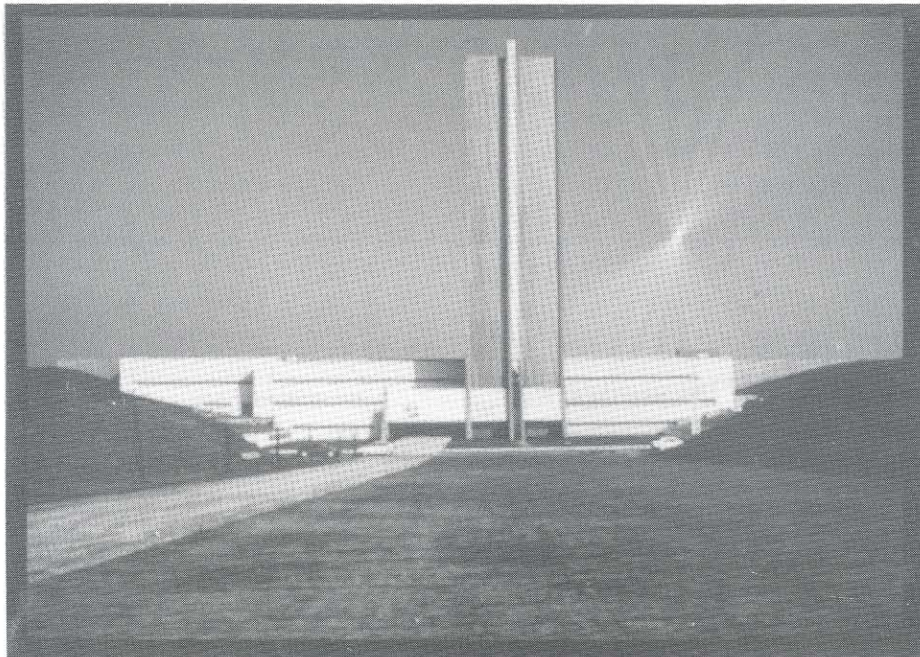
הייתי רוצה להזכיר נושא נוסף שמייחסים לו חשיבות גדולה והוא נושא האגירה. נושא זה הוזנח עד כה כיוון שחשבו במושגים של יחידות קטנות, כמויות שבעצם לא מהוות בעיה לרשת החשמל. אבל אם מדברים על אחוז הפקה ניכר של אנרגיה סולרית רשת החשמל חייבים לדאוג לאספקה אמינה. לכן חייבים למצוא פתרון לאגירת אנרגיית השמש. הפתרון שניתן לחשוב עליו הוא פתרון כימי. צריך להפוך את אנרגיית השמש לאנרגיה כימית בצורה שניתן יהיה לקבל אותה אחר כך בחזרה. המערכת הספציפית עליה אנו עובדים היא ליצור תערובת המכילה מימן או מימן נקי או מימן עם תחמוצת פחמן, הידועה כגז סינתטי. זה חומר ממנו אפשר לעשות דלקים, לשרוף אותו או לעשות ממנו מעגל סגור.

SOLAR THERMOCHEMICAL PIPELINE CONCEPT





בצילומים נראה המתקן של מכון ויצמן, כולל המראות, עמדות הנסיון, תמונה של המתקן בפעולה והפוקוס של השמש בנקודה במרחב. כן המעגל של הטורבינה. יש לנו מחמם אויר, מצד אחד נכנסת השמש המרוכזת, והאויר המחומם יוצא על טורבינה. זה מעגל ברייטון. יש קופסה שחורה אליה נכנסת אנרגיית שמש מרוכזת, ופה מקבלים תערובת מימן ותחמוצת פחמן. אפשר לדחוף אותה לאיזה מרחק שרוצים, זה קו של גז סינתיזה שמקובל, אפשר לאגור אותה תחת האדמה אם רוצים ולכמה זמן שרוצים מאחר שזו תערובת יציבה. אפשר להכניס אותה לעוד קופסה שחורה, שיכולה להיות במרחק אלף קילומטר ממנה, ולהפוך אותה לדלק על ידי קטליזטור, אז מקבלים חזרה את חומרי המוצא של אנרגיית השמש



שנכנסה. ההנחה כאן היא שאנו עושים קיטור ומריצים טורבינות. אפשר לנצל זאת גם למטרות אחרות. מעגל זה הוכח כבר לפני די הרבה זמן במכון ויצמן ואפשר להמשיך בו בלי סוף. הוכח בקנה מידה של 5 קילוואט, והיום בונים מתקן של 500 קילוואט. זו תהיה הוכחה בקנה מידה יותר הנדסי. תהליך זה אפשר להפעיל כמעגל סגור או פתוח. ברגע שיצרנו את הגז אפשר להשתמש בו בתנאי שיש לנו אספקה של איזה שהוא חומר. המעגל כפי שתואר כאן, לא לא צורך שום חומר ולא פולט שום חומר. אבל יש משאו כמו פצלי שמן, או איזה חומר אחר, ביומסה שרוצים להפטר ממנה, אפשר לשים בקופסה השחורה את החומר האורגני המתאים, ולא לסגור את המעגל כי אם לשרוף אותו ישר, וכך לנצל ביומסה. זו האפשרות שאנחנו עובדים עליה בנקודה זו.

יש גם עוד תהליך שבו אפשר לקחת פוטונים ולהפוך אותם יש לכימיה. עם אור שמש לא ניתן לעשות את זה, אבל אם לוקחים אור שמש ומשחקים אתו קצת, משנים את הספקטרום שלו, אפשר לשפר את יעילות הפוטוסינתזה. אנו מפתחים את נושא הפיכת אור שמש לאור לייזר, כי לייזר הוא אור שניתן לקבל בעוצמה רבה, בדיוק בתדירות שצריך בשביל ראקציה כימית מסויימת, והחישובים מראים שאם נצליח להפוך אור שמש לספקטרום רחב, לקחת את כל הספקטרום הזה או חלק ממנו ולהוציא אותו במקום אחד, כשהוא מכון נכון, אפשר לפתח הרבה תהליכים כימיים שכיום הם בלתי אפשריים.

יש לנו לייזרים שמנצלים אנרגיה מהשמש בעוצמות של כמה מאות וואט. אלה לייזרים מוצקים, לא לייזרים גאזים, כך שהם קטנים מאוד באופן פיסי, והכיוון שלנו הוא להגדיל את קני המידה, מפני שאם מדברים על כימיה, מדברים לא על 100-200 וואט אלא על מגוואט. מדברים על פיתוח לייזרים רבי עוצמה ישירות מהשמש. אם נצליח זו תהיה דרך להפוך פוטונים ישר למוצרים כימיים בלי לעבור דרך חום או חשמל.

האנרגיה הגרעינית כאנרגיה חלופית

אמנון ענב

המדען הראשי - משרד האנרגיה והתשתית

אני מתכוון בהרצאתי זו להציג לפניכם נתונים טכניים רבים אשר מאפשרים לבצע אינטגרציה של הבטים שונים במטרה להציג את מקומה של האנרגיה הגרעינית במערך ייצור האנרגיה העולמי. ההשלכות מהצגה זו למצב בארץ יהיו, לדעתי, פשוטות וטבעיות.

שני ארועים טבעו חותמם על התפתחות האנרגיה הגרעינית בשנים האחרונות כמקור אנרגיה עתידי. האחד הוא התאונה בכור האמריקני בפנסילבניה טרי מייל אילנד (1979) והשני, התאונה המחרידה בכור הרוסי בטטרנוביל (1986).

האפקט התקשורתי של שני תאונות אלה היה חזק והגיע לכל מקום בו חיים בני תרבות. אפשר לנתח את התקלות ולהסבירן וזאת אין בכוונתי לעשות, אני מקווה, עם זאת, שלאחר סיום הרצאתי, אפשר יהיה להוכיח שהמהומה התקשורתית העצומה הצליחה להסתיר בצורה יוצאת מן הכלל את ההשגים האמיתיים של האנרגיה הגרעינית בשנים האחרונות.

שימושי אנרגיה בעולם

(ללא אנרגיית שמש, ביומס וכו')

יחס תצרוכת	1988		1937		
	QUAD= 10 ¹⁵ BTU	%	QUAD= 10 ¹⁵ BTU	%	
$\frac{Q_{1988}}{Q_{1937}}$					
2.1	96	30	45	74	פחם
10.1	121	38	12	20	שמן
21.7	65	20	3	5	גז טבעי
22.0	22	7	1	1	הידרוחשמל
-	17	5	-	-	גרעין

האנרגיה הגרעינית תורמת עתה כחמישה אחוזים מכל תצרוכת האנרגיה בעולם. ההתפתחות של האנרגיה הגרעינית החלה בשנות החמישים כך שכל הטכנולוגיה הזו היא צעירה מאד בהשוואה לטכנולוגיות אחרות של ייצור קיטור באמצעות פחם או שמן. למרות זאת, הננו מוצאים שבמספר לא קטן של מדינות, משמש הגרעין אחד מעמודי התווך של מערכת ייצור ההספק החשמלי.

השקף הבא מציג סטטיסטיקה של השנים 1986 עד 1989 וממנו אפשר להוכיח שבמספר רב של מדינות משמשות תחנות הכוח הגרעיניות כספק עיקרי של אנרגיה חשמלית וללא ספק שהקלות היחסית שבה עברו מדינות העולם את המשבר האחרון במפרץ הפרסי נובע גם ממציאותם של כורי הכוח שהחליפו כמויות ניכרות של דלקים נוזליים ופחם בחלקי העולם השונים. מבין כל המדינות בולטת במיוחד צרפת שבה מפיקים כמות של 75% מהאנרגיה החשמלית שלה באמצעות גרעין, בבלגיה מפיקים כ-60%, בקוריאה והונגריה כ-50%, בשוודיה ובשוויצריה מעל 40%, בארה"ב הפיקו כ-19% באמצעות תחנות כוח גרעיניות ובברז"מ כ-12%.

Nuclear power's share of electricity production, 1986-89

	1989	1988	1987	1986		1989	1988	1987	1986
France	74.6	69.9	69.8	69.8	United Kingdom	21.7	19.3	17.5	18.4
Belgium	60.8	65.5	66.0	67.0	United States	19.1	19.5	17.7	16.6
Republic of Korea	50.2	46.9	53.3	43.6	Canada	15.6	16.0	15.1	14.7
Hungary	49.8	48.9	39.2	25.8	USSR	12.3	12.6	11.2	10.1
Sweden	45.1	46.9	45.3	50.3	Argentina	11.4	11.2	13.4	12.2
Switzerland	41.6	37.4	38.3	39.2	German Dem. Rep.	10.9	9.9	9.7	9.7
Spain	38.4	36.1	31.2	29.4	South Africa	7.4	7.3	4.5	6.8
Finland	35.4	36.0	36.6	38.4	Yugoslavia	5.9	5.2	5.6	5.4
Germany, Fed. Rep.	34.3	34.0	31.3	29.4	Netherlands	5.4	5.3	5.2	6.2
Bulgaria	32.9	35.6	28.6	30.0	India	1.6	3.0	2.6	2.7
Japan	27.8	23.4	29.1	24.7	Brazil	0.7	0.3	0.5	0.1
Czechoslovakia	27.6	26.7	25.9	21.1	Pakistan	0.2	0.6	1.0	1.8
					Italy	0.0	0.0	0.1	4.5

Expressed as percentage of total electricity produced.

Note: In Taiwan, China, the percentages for 1989 to '986 are 35.2%, 41%, 48.5%, 43.8%.

מתוך הנתונים ברור שהתחנות הגרעיניות מהוות משענת אמיתית להספקת אנרגיה חשמלית בעת קרות משברים באספקת אנרגיה קונבנציונלית, יהיו אלה משברים סוציאליים כגון שביתות כורים או משברים מדיניים, דוגמת מלחמת המפרץ.

למרות עובדות אלה ובנוסף להן, העובדה הפיסיקלית הפשוטה שהאנרגיה הגרעינית יכולה לספק כמות עצומה של אנרגיה, ובעצם את מירב האנרגיה החשמלית המופקת בעולם, עדיין אין האנרגיה הגרעינית תופסת את מקומה המתאים במערך האנרגיה העולמי. עובדה זו נובעת מהסטורית הכנסתם של כורים גרעיניים לרשתות החשמל בעולם. בשנות הששים, עם כניסתם של כורי הכוח הראשונים למערך הייצור במדינות שונות בעולם, נעשו טעויות על ידי מתכננים מערכות הכור ועל ידי הארכיטקט אינז'נר שבצע אינטגרציה של מערכות אלה ומערכות הטורבינה לכדי תחנת כוח אחת. גם רשויות התחיקה ביצעו שגיאות בגישתם אל נושאי הרישוי של כורי הכוח שהיוו טכנולוגיה חדישה ובלתי מוכרת עבורם. כדי להתגבר על טעויות אלה, נהגו רשויות התחיקה בארה"ב לבצע תחיקה רטרואקטיבית שגרמה לעיכוב בהפעלת תחנות הכוח ולהעלאת מחירים של תחנות הכוח המוקמות לפעמים בפקטור של פי שניים ויותר. העלאת המחיר נבעה משני גורמים; הראשון הנובע מהשינויים הפיסיקליים במערכות הכור והתוספות למיניהן לצורך שיפור בטיחות הכור, והשני הגדלת הרבית בזמן ההקמה של הכור.

העיכוב נובע גם מלחצם של קבוצות "אקולוגיות" שראו, ואולי רואים בכורים "אם כל חטאת" מבחינה אקולוגית, וכמובן מהפיגוע הגדול שנוצר אחר הפסקת בניית הכורים לאחר התאונות של טרי מייל אילנד וצ'רנוביל, אותן הזכרתי לפני כן.

קרוב לודאי שמצב הדברים הנוכחי נובע מכך שהאנרגיה הגרעינית עדיין אינה טכנולוגיה בוגרת דוגמת שריפת הפחם או הנפט או הפקת חשמל באמצעות מפלי מים הקיימים בצורתם הנוכחית, פחות או יותר, מאז המהפכה התעשייתית.

אין לשכוח שכורי הכוח הנוכחיים הם בעצם תולדה של טכנולוגיה צעירה מאד ושל חשיבה מערכתית שמקורה בצרכים שזוהו לאחר מלחמת העולם. לכן, עוד זמן רב לפני התאונות אותן הזכרתי לעיל, התבצעה בחינה מחודשת של תפיסות טכנוניות וניהוליות במטרה ליצור טכנולוגיות גרעיניות יותר משופרות ולהביאן לכדי מימוש. תמונת המצב הנוכחית מוצגת בשקף 3 המתאר את הסטטוס במדינות בהן יש כורי כוח.

Preliminary nuclear power status at end 1990, with corresponding data for 1989 in parentheses

	Operational	Being built		Operational	Being built
Argentina	2 (2)	1 (1)	Japan	41 (39)	10 (12)
Belgium	7 (7)		Korea, Rep of.	9 (9)	2 (2)
Brazil	1 (1)	1 (1)	Mexico	1 (1)	1 (1)
Bulgaria	5 (5)	2 (2)	Netherlands	2 (2)	
Canada	19 (18)	3 (4)	Pakistan	1 (1)	
China		3 (3)	Romania		5 (5)
Cuba		2 (2)	South Africa	2 (2)	
Czechoslovakia	8 (8)	6 (8)	Spain	9 (10)	
Finland	4 (4)		Sweden	12 (12)	
France	56 (55)	6 (9)	Switzerland	5 (5)	
Germany	25 (30)	6 (6)	United Kingdom	37 (39)	1 (1)
Hungary	4 (4)		United States	112 (110)	1 (4)
India	8 (7)	6 (7)	USSR	47 (46)	25 (26)
Iran, Islamic Rep. of		2 (2)	Yugoslavia	1 (1)	

At end 1990, nuclear power plants in operation: 424; under construction: 83.

The total includes Taiwan, China where six reactors are in operation.

בשקף זה מציגים את מספר כורי הכוח הפועלים במדינות שונות ברחבי העולם.

בסוף שנת 1990 פעלו בעולם 424 כורי כוח מסוגים שונים. סה"כ ההספק המותקן היה 324,496 מגהווט חשמליים וזו עליה קלה בשהוואה למספר המגווסים שהיו מותקנים בשנת 1989, שהם 318,271 מ/ווט חשמליים. בשנת 1990 חוברו לרשתות החשמל ברחבי העולם 10 כורי כוח חדשים, במדינות שונות: קנדה 1, צרפת 3, יפן 2, ארה"ב 2, ובריה"מ 1. למרות שהפעלו כורים אלה, ניכרת עתה תחושת סטגנציה אצל אנשי התעשייה הגרעינית, מחוסר הזמנות נוספות ב"צינור".

לעומת זאת הפסיקו עבודתו של 12 כורי כוח בשנת 1990: צרפת 2, גרמניה 5, איטליה 2, ספרד 1, אנגליה 2. בשנת 1990 היו בבניה עוד 83 כורי כוח במקומות שונים.

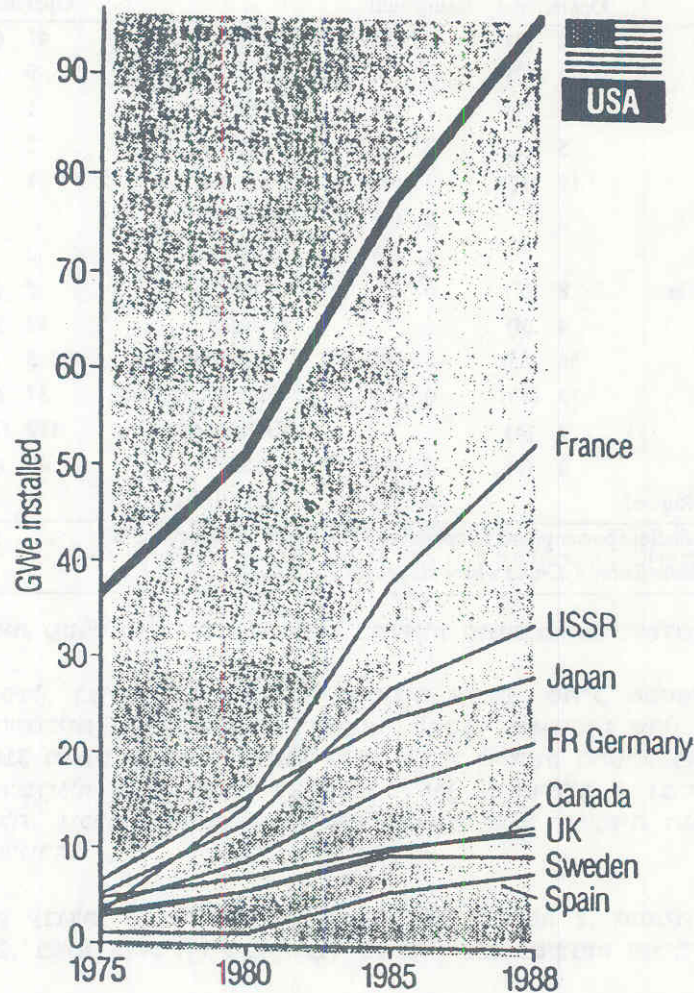
סטטיסטיקה מעט שונה ויותר מעודכנת מופיעה בפרסום Nuclear Engineering International מאפריל השנה.

סה"כ האנרגיה שסופקה על ידי תחנות גרעיניות היתה כ-17% מכל האנרגיה החשמלית שיוצרה בעולם. כך מצטיירת התמונה הברורה שלמקום כורי הכוח בין יצרני החשמל, ושל הכמות הגדלה והולכת של החשמל המופק מכורי כוח בעולם.

אם מנתחים את סוגי הכורים שהוצאו מרשתות החשמל לעומת אלה שהוכנסו לתוכם, מתגלית תמונה אופיינית המלווה טכנולוגיה מתפתחת, כלומר, הוציאו משימוש כורים שעבדו זמן רב יחסית והספקם נמוך, בתחום מ-92 עד 480 מגאווט, רובם מקוררים בגז. והכניסו במקומם כורים חדישים יותר בהספקים גבוהים - 550 עד 1330 מגאווט המקוררים ברובם על ידי מים רגילים ומיעוטם על ידי מים כבדים.

קצב ההכנסה לפעולה של הכורים הגרעיניים היה גדול מאד בשנות השבעים והשמונים. שנות התשעים יהיו, לעומת זאת, שנים שבהן לא הותקנו כורים רבים, בעיקר בעקבות הפסקת הבניה שבאה בעקבות הסיבות שאותן הזכרתי מקודם.

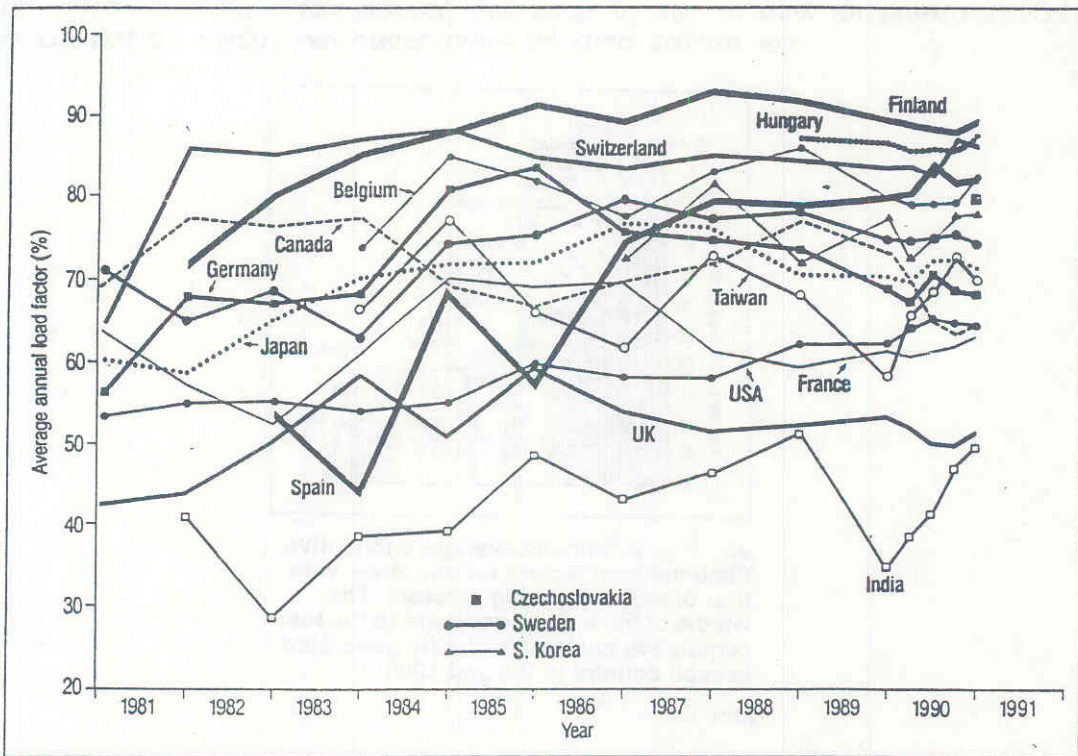
שקף 5 מציג בצורה גרפית את קצב הכנסתם של כורי כוח במדינות מפותחות בעולם.



▲ Nuclear installed capacity growth (net GWe).

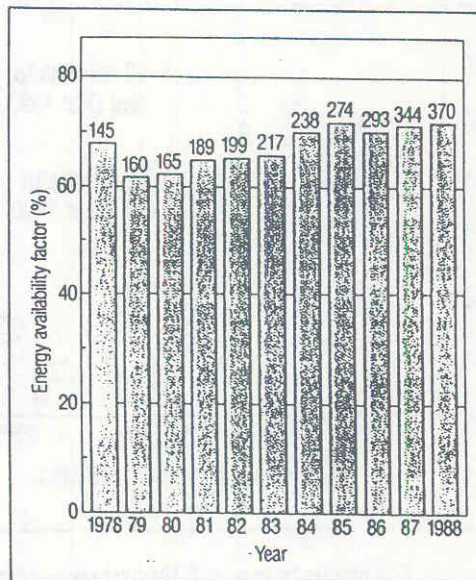
אחד הגורמים המעידים על בגרות הטכנולוגיה הוא התפתחות מקדם העומס או היכולת של תחנות הכוח השונות והזמינות שלהם.

מקדם העומס או היכולת מוגדר כיחס שבין כמות האנרגיה המופקת למעשה באמצעות תחנת הכוח, לבין כמות האנרגיה הנומינלית שאותה אפשר להפיק מתחנה. על מקדמים אלה יש סטטיסטיקה רבה, מתוכה בחרתי להציג את זו של N.E.I. מאפריל 1991.



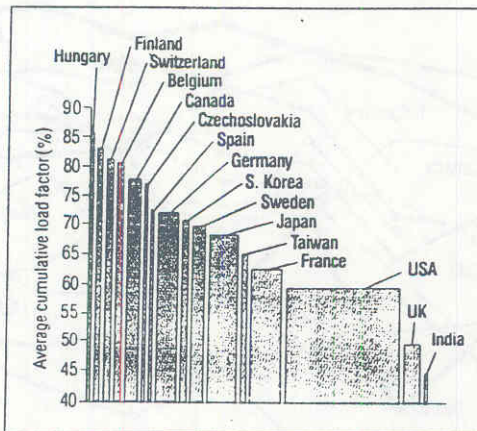
▲ Trends in annual arithmetic (unweighted) average load factors for countries operating four or more reactors.

בשקף הנני מציג את מקדם העומס, (Load Factor), של הכורים. נהוג להציג בדרך כלל את מקדם העומס של הכור במטרה להראות כיצד מנצלים מפעילי הכור את האנרגיה אותו הוא יכול לספק. בשנים האחרונות, לאור העובדה שחלק גדל והולך של הכורים החל פועל כתחנות כוח של load follow, הרי שזה יותר נכון להתייחס לזמינות האנרגטית של הכור ולא דווקא לאנרגיה המופקת ממש ובפועל מהכור. תמונה זו אפשר לראות בשקף 7.



▲ Average availability for reactors larger than 100MWe. Numbers of units are shown (source: PRIS).

הסדר היורד של מקדם העומס המצטבר ניתן בשקף 8. שקף זה מציג את ההשגים בתפעול כורי כוח במדינות העולם, ואת המספר היחסי של כורים במדינות אלה.

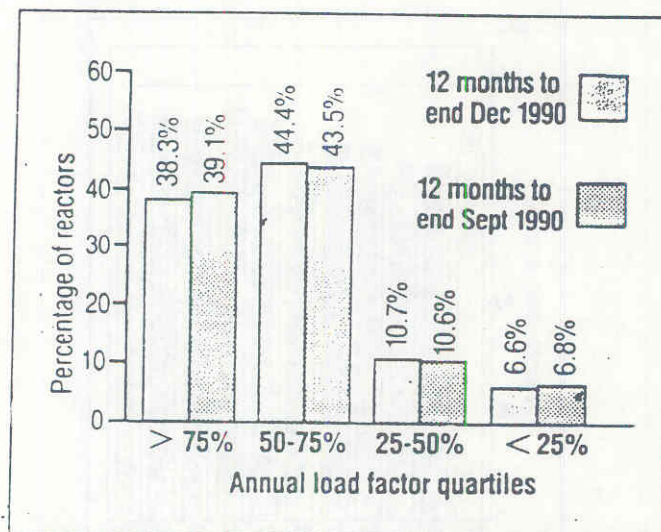


▲ Arithmetic average cumulative (lifetime) load factors for countries with four or more operating reactors. The widths of the bars correspond to the total cumulative nuclear electricity generated in each country to the end 1990.

April 1991

הסטטיסטיקה מביאה בחשבון אי-זמינות אנרגטית, אם כיבוי הכור לא תוכנן שלושה חודשים מראש בתכנית העבודה של תחנת הכוח, או בתכנית העבודה השנתית שלה.

ניתוח מקדמי העומס של הכורים המסחריים מציג תמונה מאד מעודדת של 39% מהכורים הם מעל 75% מקדם עומס. 44% מהכורים הם בין 50% ל-75% מקדם עומס. כ-11% מהכורים מצויים בין 25% ל-50% מקדם עומס, וכ-6% מהכורים הם מעל 25% מקדם עומס. במשך השנים האחרונות רואים נטיה ברורה של הגדלת מקדמי העומס, למרות שבשנה האחרונה חלה ירידה קלה במקדם זה.

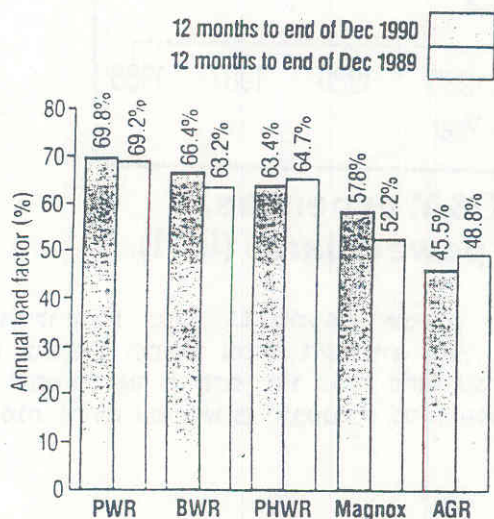


▲ Percentage of Western World's reactors in each of the annual load factor quartiles, 1989 and 1990.

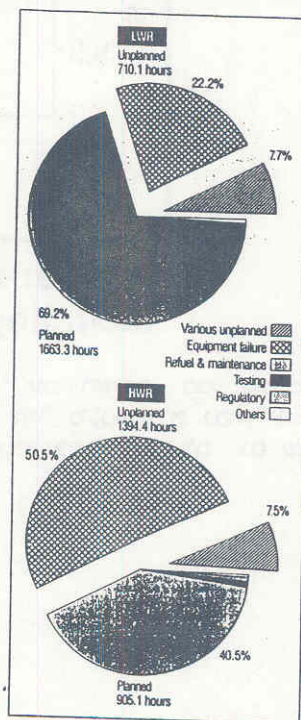
ניתוח מקדמי העומס בשנים האחרונות (1989/90) מציג את התמונה הנראית בשקף 10 ובו ניתן לראות שכורי כוח מסוג PWR הם בעלי מקדמי עומס ממוצעים גבוהים ביותר של כמעט 70 אחוז.

ניתוח גורמי האי זמינות ב-17 השנים האחרונות מציג את התמונה המצטיירת בשקף 11.

בכורים מסוג LWR סה"כ זמן העצירה השנתי היה 2373 שעות המשתווה לזמינות ממוצעת של 72.9%, זאת לעומת כורים מסוג HWR בהם ניתן להבחין זמן עצירה של 2295.5 שעות בשנה היוצרים זמינות ממוצעת של 73.8%.



▲ Comparison of 1989 and 1990 annual average load factors for the main reactor types (arithmetic averages).



▲ Reactor outage distribution by cause 1971 to 1988, (above, LWR and below, HWR) according to PRIS.

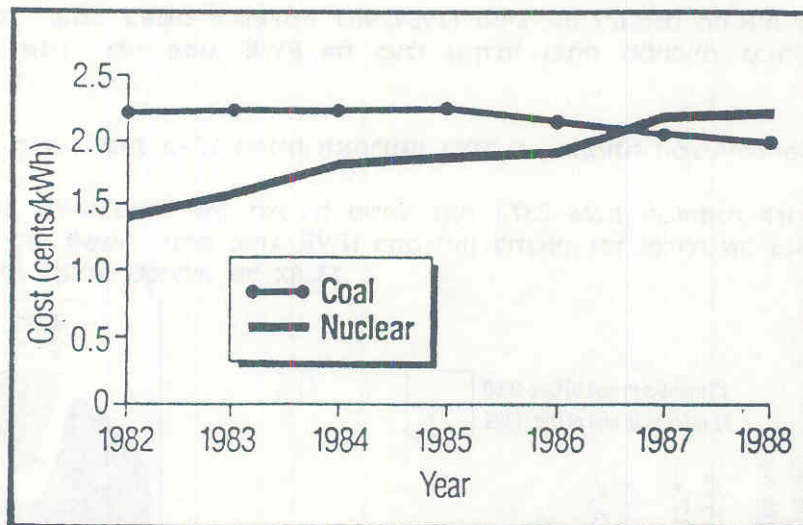
למרות ההשתפרות בהגדלת מקדמי הזמינות של הכורים אפשר להבחין בעליית מחירי התפעול והתחזוקה של כורי הכוח כך שסה"כ היתרון הכלכלי שהיה להם על הפחם הלך וקטן.

בשקף 12 אפשר לראות את הזחילה הקבועה שקרתה בעלויות האחזקה והתפעול של כורי הכוח בשנות השמונים לעומת ירידת עלות זו בתחנות הפחם. יש, להערכתנו, לצפות בעתיד הלא רחוק, התיצבות בערכים אלה של הוצאה עבור תחזוקה ותפעול ואף ירידה עד להשתוות עם מחירי תחנות הפחם, וזאת לאור התבגרות המערכות

המופעלות של מפעילי הכורים.

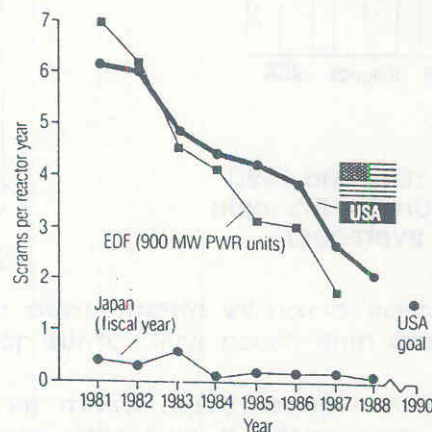
מקדם תפעולי מעניין מאד היכול להעיד על בגרות הטכנולוגיה הוא מספר ה"סקרמים" או הכיבויים המאולצים של תחנת הכוח.

ככל שמספר ההספקות קטן כך אפשר לקבוע שהטכנולוגיה בשלה יותר, שמפעילי התחנות מנוסים יותר ושמערכת הכוח בה מותקנת תחנת הכוח הגרעינית ערוכה יותר להפעלת מערכת זו בתוכה.



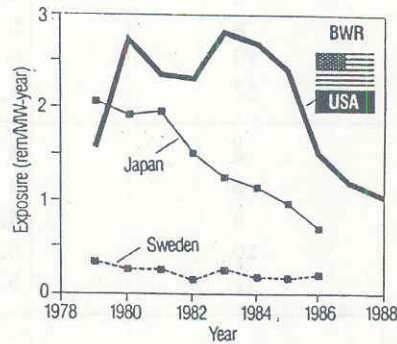
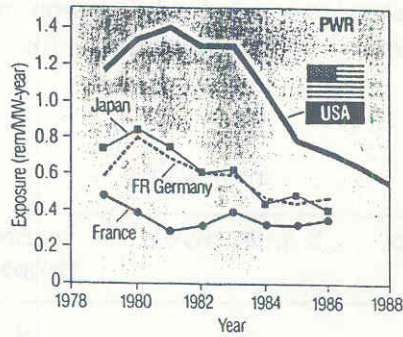
▲ Average variable O&M expenses, including fuel, for US power plants (UDI).

אפשר להיווכח בשקף 13 שמספר העצירות המאולצות הלך וקטן עם השנים, ככל שנרכש נסיון בהפעלת הכורים בשנות השמונים. ביפן, שבה מקדם העומס היה מלכתחילה גבוה יותר מזה שבצרפת או ארה"ב, היו תמיד פחות עצירות מאולצות בהשוואה למדינות אלה. גם שם מסתמנת ירידה עם השנים, לכשנרכש נסיון תפעולי רב.



▲ Trends in reactor scrams (per reactor year).

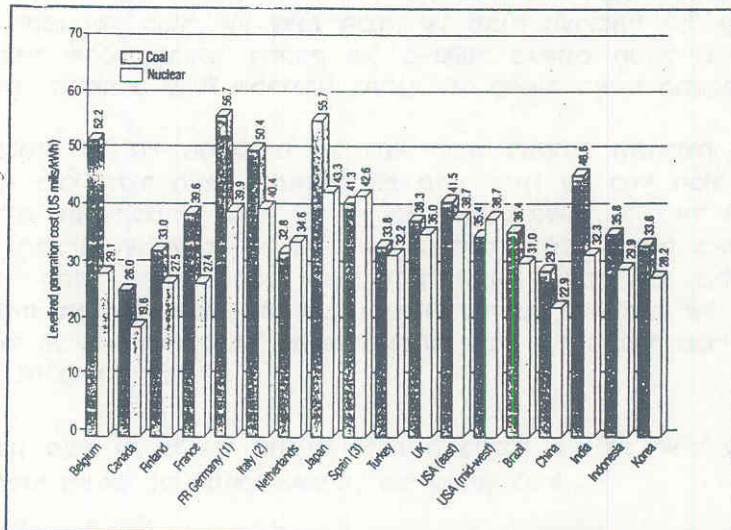
גורם נוסף אותו אפשר להביא בחשבון לצורך זיהוי התבגרות הטכנולוגיה הוא רמת החשיפה של העובד לקרינה רדיואקטיבית. גם כאן ככל שהחשיפה השנתית לעובד קטנה יותר, יש מקום להסיק שמתכנני הכורים ומפעיליהם מכירים הכרות יותר יסודית את הטכנולוגיה. הכרות זו מאפשרת תכנון יותר נכון של הפעילות מסביב ובתוך מתקני כור הכוח המתבטא בסופו של דבר בהקטנת החשיפה לעובדי הכור ואנשי התחזוקה בו בכלל.



▲ Trends in occupational radiation exposure.

חישובים שבוצעו בהסתמך על נתונים במספר מדינות, מראים לנו שברוב המדינות עלות ייצור האנרגיה באמצעות גרעין נמוכה יותר מזו המיוצרת באמצעות פחם.

בשקף זה מוצגים נתונים שפורסמו על ידי IAEA בהסתמך על הנסיון במדינות OECD. אי לכך חושבו הערכים בשעור נכיון של 5%. בארץ אין זה שעור הנכיון המקובל על אנשי האוצר והחישוב יראה שונה.



▲ Levelized generation costs, assuming 5 per cent discount rate, for coal-fired and nuclear power plants in constant January 1987 money. Nuclear is holding its ground in most countries, but cheaper coal could change all that.

Notes: 1 Indigenous coal. 2 Average coal case. 3 Imported coal. Canada, USA, Brazil, China and India also have regions with lower coal costs. The use of higher discount rates would increase the cost of nuclear relative to coal (see article).

November 1989

בטבלה הבאה מוצגים תוצאות החישוב של עלות החשמל המופק בתנאי הארץ מתחנת כוח פחמית עם קולטנים ומתחנת כוח גרעינית אקוילנטית, השפעת שער הנכיון על התוצאה נראית בבירור.

עלות החשמל

גרעין	פחם + קולטנים	שעור נכיון %	מקדם יכולת %
4.2	4.3	4	63
4.7	4.7	6	63
5.2	5.1	8	63
5.7	5.5	10	63
6.3	6.0	12	63
3.8	4.1	4	73
4.2	4.4	6	73
4.6	4.7	8	73
5.1	5.1	10	73
5.6	5.5	12	73

כפי שציינתי מקודם, הננו נמצאים עדיין עם הדור הראשון של כורי הכוח. בדור זה נקבעה פילוסופית התכנון עוד בשלהי מלחמת העולם השנייה, כתוצאה מהתפתחותם של כורי הצוללות הגרעיניים מיד לאחר המלחמה. בעת האחרונה מחפשים בחברות התעשייתיות שייצרו כורים מסחריים את ה"דור השני" של כורי הכוח. בדור השני מקווים לבנות כור שיהיה יותר פשוט וקל לבצע את פעולות הרישוי עבורו. אפשר להשיג זאת על ידי תכונות פיסיקליות שייבנו לתוכו על ידי המתכננים.

כורי הדור הראשון נבנו בצורה אבולוציונית מאולצת כאשר דרישות הרישוי נקבעו בתוך תקופת התכנון של הכור. שינוי דרישות הרישוי תוך כדי בניית כורי הכוח השפיע בצורה מאד נחרצת על משך ההקמה של הכור, על עלות הכור, על מבנה מערכתיו ועל קלות תפעולו. כדוגמא אפשר לציין שבכור גרעיני בהספק של כ-1000 מגאוט חשמליים מצויים עתה כ-40,000 שסתומים, לעומת כ-5000 שסתומים בתחנת כוח פחמית באותו ההספק.

לאור הלקחים שנלמדו על ידי המתכננים של כורי הכוח בתקופה האחרונה הוחל בנסיון לאפיין ולתכנן את כורי הדור השני. המאפיין את הדור השני של כורי הכוח הוא הנסיון לתכנן ולבנות כורים יותר קטנים, בגודל של כ-600 מגאוט לעומת 900 עד 1350 מגאוט של הדור הקודם. הכורים החדשים יהיו גם יותר פסיביים, כלומר כורים כאלה שתגובתם העצמית בעת פרוץ תקלה חמורה תהיה איטית ולא תגרום לשינוי מצב מהיר מאד של הריאקטור. התפתחות התרחיש והמצב המסוכן יתנהלו תוך בקרה עצמית של הכור ובקצב כזה שלא יכביד על פעילות המפעיל ועל איכות תגובתו, גורם שהיה מאד מכריע בהתפתחות התקלה בטרי מייל אילנד ובצ'רנוביל.

אפשר להשיג איפיון מעין זה על ידי שינויים מהותיים בתכנון מערכות העזר של כור הכוח ובעיקר על ידי הקטנת הספקו או הספקו הסגולי, כפי שצויין לעיל.

בכורים מסוג Advanced Light Water Reactors מנסים המתכננים להשיג האפקט הדרוש בעיקר על ידי הקטנת הספק הכור. בכורים מסוגים אחרים, כגון HTGR ניסו המתכננים להשיג האפקט הנדרש על ידי הספק סגולי נמוך של ליבת הכור. המתכנן דאג לכך

שההספק ליחידת נפח בליבת כור הכוח יהיה נמוך מסדר גודל של מספר קילוואטים בודדים לליטר, לעומת מספר עשרות קילוואטים לליטר בכורי המים הקלים. ערך נמוך זה יגרום לכך שהתחממות הכור בעת תקלה תהיה בקצב כזה שהאינטראקציה כור-אקדם לא תבצע תחת לחץ של ארועים תכופים המופעלים כתוצאה מקיום טרנזינט מהיר מאד של טמפרטורה הנובע משחרור כמות אנרגיה בלתי מבוקרת.

הכורים המתקדמים הפסיביים מסוג LWR מפותחים בארה"ב במימון חברות החשמל ומחלקת האנרגיה משרד ההגנה, גם חברות חשמל ממדינות חיצוניות כגון איטליה, יפן, קוריאה וטאיוון משתתפים במימון עבודה זו. במסגרת העבודה פותחו תכנונים פסיביים עבור כורים מסוג PWR ועבור כורים מסוג BWR. האלמנטים העיקריים המתוכננים בכור מסוג PWR 600 מתוארים להלן:

- דלק דומה לדלק בכור רגיל, שמוש בתחמוצת אורניום.
- הקטנת צפיפות ההספק בליבת הכור (74 קילוואט לליטר).
- שימוש בחומרים מתקדמים יותר לבניית המיכל ומיצרי הקיטור.
- שימוש במשאבות טבולות ללא קירור חיצוני.
- הגדלת נפחי המים המשמשים בחירום והגדלת הלחץ.
- קירור פסיבי של הכור במקרה תקלה.
- התזת מים למערכת הראשית של הכור מתוך מצברי מים בלחץ חנקן.
- הצפה גרויטציונית של הלבה מתוך מיכלי מים הנמצאים בגובה.
- סילוק חום שיורי במערכת קירור בלחץ גבוה, וסיפון תרמי.
- קירור מאטם הכור בעת תאונה באמצעות התזת מים ממיכל המצוי מעליו.
- הפעלת קירור חירום על ידי פתיחת שסתומים בלבד.

השימוש בעקרונות התכנון המתוארים לעיל מביאים לחסכון ניכר בציווד ורכיבים המותקנים בכור הכוח. חסכון זה ינוע בתחום שבין 35% ל-85% ברכיבים השונים: החסכון ישפיע על ההסתברות לתקלה, על משך ההקמה ועל עלות הכור. לכל אחד מהגורמים האלה יש משמעות מכרעת על ההחלטה לרכוש כור ועל ערכו הכלכלי.

חתך כללי של הכור מסוג AP-600 המכיל את כל הרכיבים העיקריים שיהיו בכור זה לכשייבנה, ניתן להלן בתמונה שבעמוד הבא.

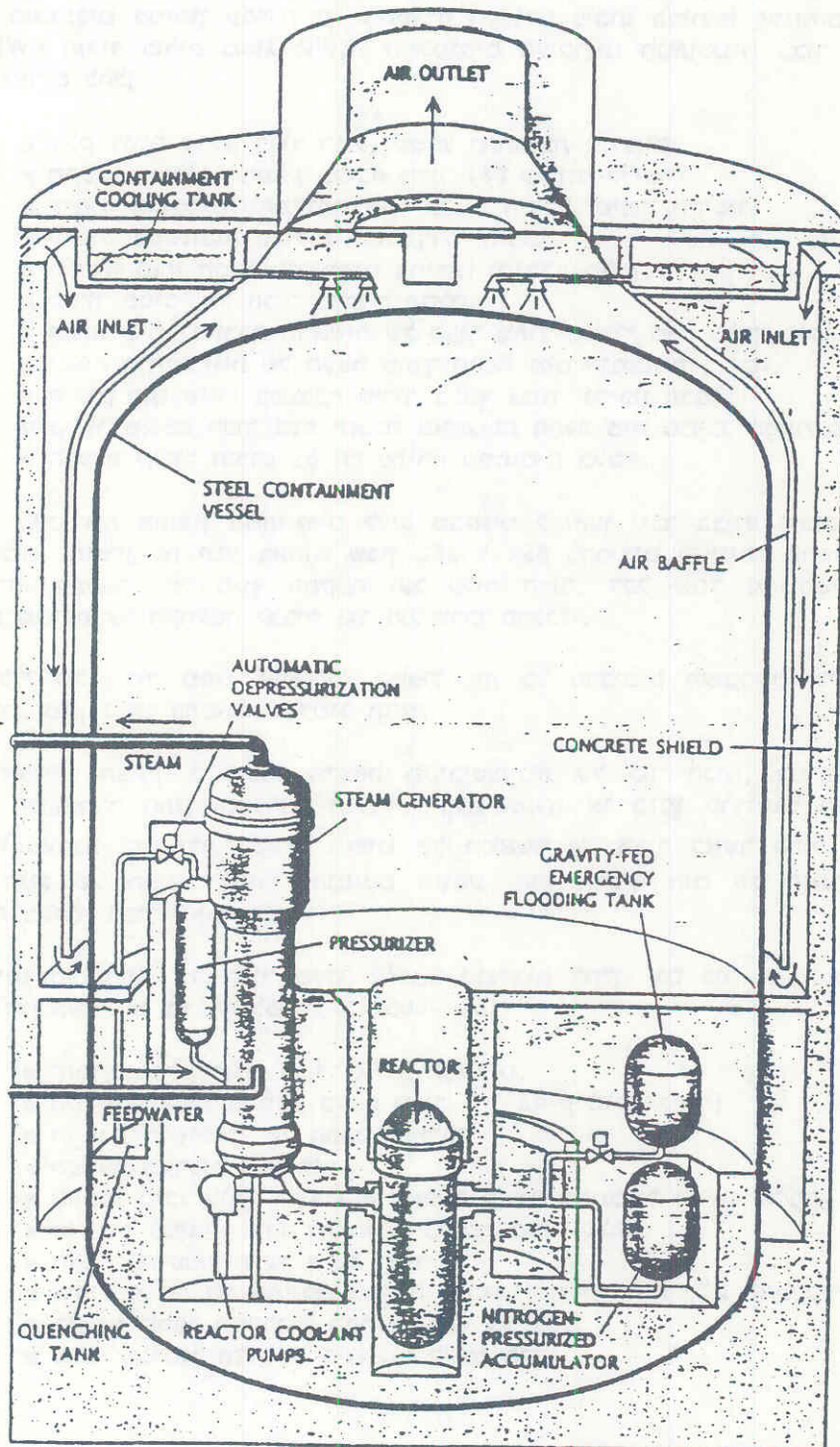
בחתך אפשר להבחין במערכות ההצפה הגרביטציונית של כור הכוח, במיכל העיבוי של הקיטור המשתחרר מתוך המערכת הראשית בעת תקלה או בזמן טרנזינט המתחולל בכור גרעיני ובמערכת המיוחדת לקירור חיצוני של המאטם של הכור כאשר הכור מאבד קירור חיצוני רגיל של החום השיורי והמאטם משמש מעין תחליף חום של האנרגיה השורית המיוצרת בליבת הכור לאחר כיבוי.

הפרמטרים העיקריים של הכור מסוג SBWR מוגדרים להלן. גם כור זה הוא בהספק של 600 מ/וואט חשמליים בדומה לכור מסוג AP-600.

- שימוש בדלק דומה לכורי BWR הרגילים.
- הקטנת צפיפות ההספק בלבת הכור (ל-42 קילוואט לליטר)
- הרחבת ה"שולים" של התכנון התרמי
- הפשטת מערכות הבטיחות.
- התקנת מיכל ליבה גדול כדי לאפשר קירור באמצעות הסעה טבעית.
- מערכות פסיביות להורדת הלחץ בליבה בעת תקלה.
- הצפה גרויטציונית של ליבת הכור.
- קירור פסיבי של המאטם בתקלה מאפשר סילוק החום ללא התערבות מפעיל.
- הקטנת מספר המערכות מסוג Safety Grade
- ביטול גנרטור הדיזל והמשאבות לשעת חרום.

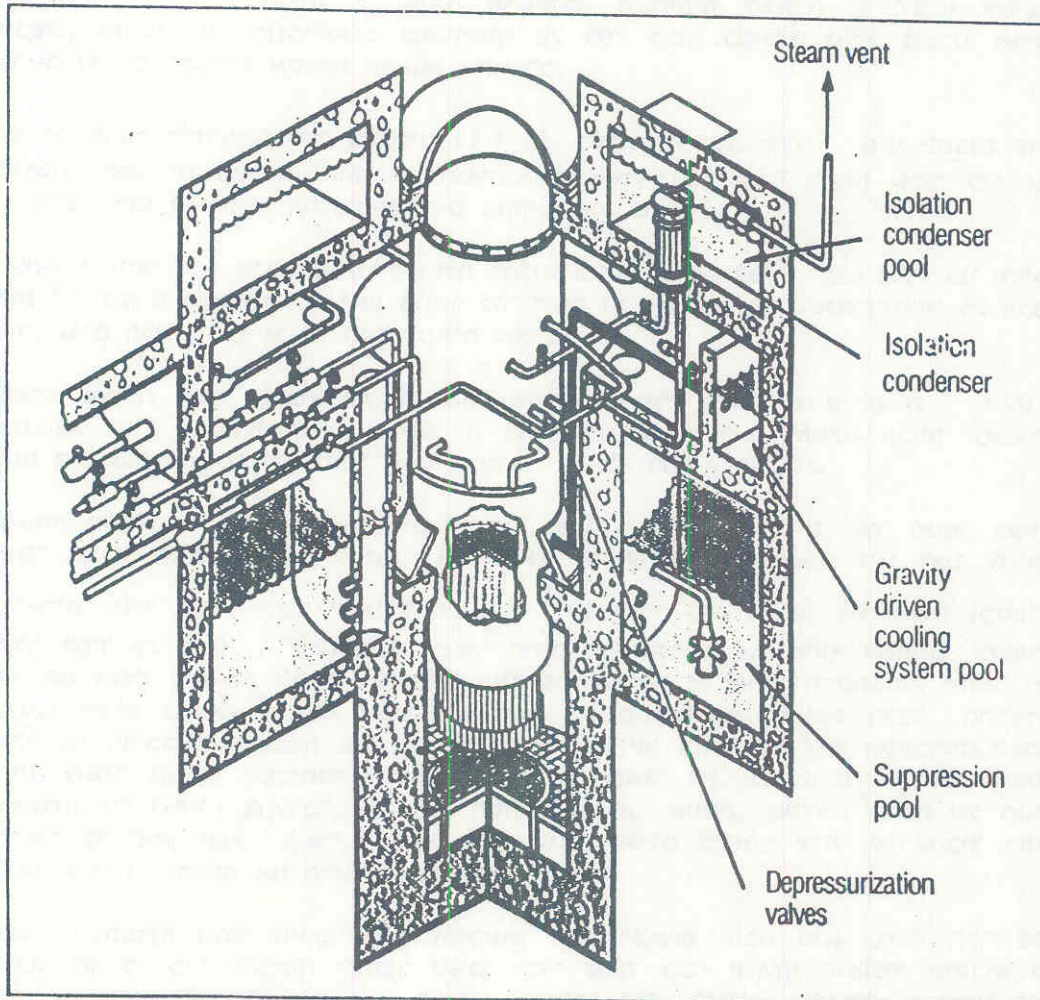
Westinghouse Advanced

Reactor Design AP-600



כתוצאה מתכנון על פי פרמטרים עיקריים אלה אפשר להגיע לחסכון ניכר במספר הרכיבים בהם משתמשים בכור החדש לעומת הכור מסוג BWR הרגיל. החסכון ינוע בתחום בין 30 ל-100%. גם במקרה של כור זה החסכון המושג משפיע על אמינות הכור, על משך הקמתו ועל עלותו.

חתך הכור מיוצג על ידי שקף 23. בשקף זה אפשר לראות בבירור את שלושת המיכלים הנמצאים מסביב למיכל הליבה של הכור והמיכלים כמויות גדולות של מים. בכמויות מים אלה ישתמשו בעת חירום לצורך הצפת הליבה או לעיבוי מי פריצה כתוצאה מטרנזיינט במערכות הכור.



▲ SBWR loss of coolant accident response. The suppression pool absorbs blowdown energy, the reactor pressure vessel is depressurized by the depressurization valves and then flooded by the gravity driven cooling system. The isolation condenser removes decay heat. No containment flooding is required for most breaks.

כור עתידי נוסף הוא הכור מסוג HTGR. לכור זה מספר תכונות המהוות גורם משיכה רצוי למתכנני מערכות האנרגיה העתידיות. הכור הוא כור גרפיט מקורר הליום שהוא גז אינרטי ובעל צפיפות אנרגיה נמוכה.

בעת האחרונה החליטו החברות המתכננות לא להמשיך בפיתוח הכור הזה מאחר והם לא הצליחו לגלות עבורו שוק עתידי מבטיח במידה מספקת.

הכורים מסוג HTGR שפעלו עד לתקופה האחרונה לא הראו ביצועים מרשימים במיוחד. למרות זאת יש כאלה הטוענים שכורים מסוג זה הם בעלי פוטנציאל רציני עבור תחנות כוח גדולות או קטנות לכשיוקמו בתחילת המאה הבאה.

לאור השיפורים בביצועים של כורי הכוח, נשאלת השאלה מדוע בכלל יש צורך בכניסה לדור השני של כורי הכוח? לי נראה שהתשובה האמיתית לשאלה זו נובעת במישרין מהכשלון הניהולי של האמריקנים בהנכנסתם של כורי הכוח לשימוש נרחב כיצרני אנרגיה אמיינים וזולים במערכת אספקת החשמל בארה"ב.

דבר זה אפשר לראות בבירור בשקפים 13 ו-14. כשלון זה נבע, לדעתי, מאי ההבנה שגילו המנהלים הבכירים בחברות החשמל האמריקאיות אשר לא השכילו להבין שכור כוח אינו עוד תחנת פחם או מזוט השורפת אורניום במקום דלק פוסילי.

בנושאי תחזוקה דרך אימון מפעילים וכלה בהכנת בסיס הרישוי לכורי הכוח עוד לפני שכור הכוח ירד מקרש השרטוט. כל זאת בנוסף להקפדתם על עקרונות של סטנדרדיזציה של תכנון הכור, גורם תכנוני שבו נכשלו האמריקאים לחלוטין.

השיטה הנהוגה כיום לביצוע של אנליזות סיכונים בכורי כוח היא שיטת ה - PRA - Probabilistic Risk Analysis. בשיטה זו משתמשים בהסתברות שתקלה תקרה ומכפילים אותה בתוצאות התקלה כדי לקבל אינדיקציה של תוחלת חומרת התקלה.

השימוש בשיטת ה-PRA לחישוב חומרתן של תקלות בכורים גרעיניים יוצר מספר בעיות. בעיקר יכולה השיטה לגרום לתיאור מעוות של אירועי אסונות מאחר ואז הננו עוסקים

במספרים מאד קטנים, מסדר גודל 10^{-5} ו- 10^{-6} עבור נזק לליבת כור הכוח ומספרים מסדר גודל של 10^{-7} ו- 10^{-8} עבור פיזור חומר רדיואקטיבי אל מחוץ למאטם. מספרים אלה הם חסרי משמעות לאדם שמקצועו אינו סטטיסטיקה או תורת ההסתברות מאחר והם מציגים בעצם מצבים של אי התכנות לגביהם יש סטטיסטיקה מועטה בלבד. המספרים האלה גם מורכבים ממכפלות או מצרופים של הסתברויות כאשר כל ערך הסתברותי שנבחר מחייב מאגר נתונים סטטיסטיים וניתוח אמין של מאגר זה, גם גורם זה יכול להוסיף לאפשרות של טעויות בהערכה. התוצאה הסופית נובעת, איפוא, מסדרה שלמה של הנחות שחישוב על פיהן יכול, אמנם, להציג סדרי גודל, אולם צירופם עלול גם להכיל בתוכו שגיאה גדולה, שתעוות את התוצאה הסופית.

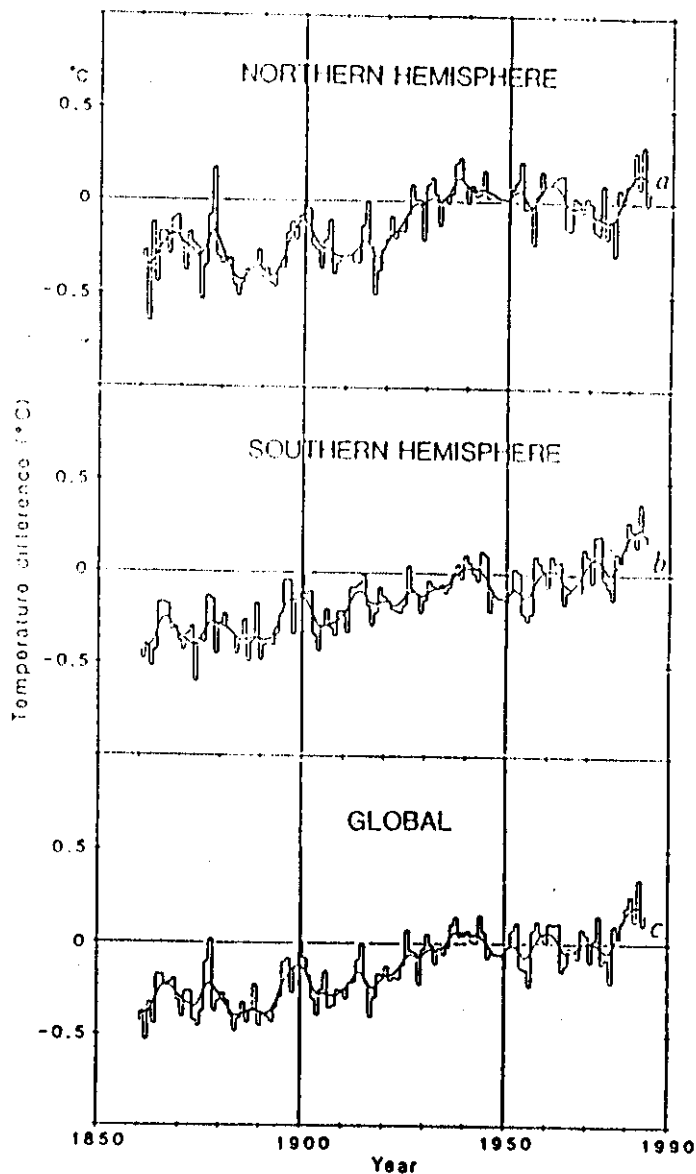
מושג ההסתברות מוכר היטב לסטטיסטיקאים ומתמטיקאים אולם הוא כמעט חסר מובן לציבור הרחב. כדי להבטיח לציבור שאכן הכור עומד בפני תקלות ותאונות חמורות כפי שטוענים המתכננים יש להמחיש לציבור שההסתברות לתקלה שתגרום לפיזור חומר רדיואקטיבי היא בעצם אפס, ולא מספר קטן שאותו קשה מאד להבין. תפיסה תכנונית מעין זו מונחת ביסוד התכנון של מערכות המאטם של הכורים החדשים מסוג ALWR השינוי הזה מציג עתה פילוסופיה לפיה נמנעת יציאה של חומר רדיואקטיבי מתוך הכור על ידי שמירה על שלמות מאטם הכור בכל דרך אפשרית.

קשה לשוחח על הנושא של כורים גרעיניים בהקשר להיותם צורת אנרגיה אלטרנטיבית מבלי להתיחס לנושא אפקט החממה. אפקט החממה נוצר על ידי מספר גזים הנמצאים

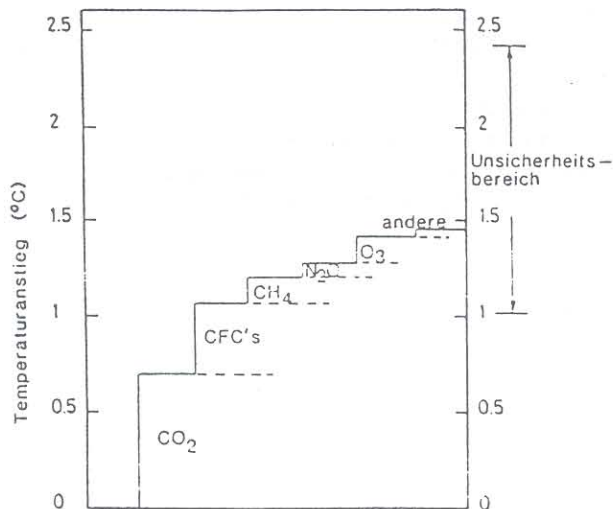
באטמוספירה והם זו תחמוצת הפחמן CO_2 תרכובות הגזרים המכילים קשרים בין פחמן לפלואור, המתן CH_4 , תחמוצת החנקן NO_x , האוזון O_3 ויתכן אף גזים אחרים.

עתה פולטים לאטמוספירה כמות של CO_2 הנוצרת משריפת 6 גיגהטון פחם מדי שנה. המשמעות היא שאם הננו מעוניינים להקטין את אפקט החממה עלינו להוריד את שרפת הפחמן לכמויות סבירות של כ-1 גיגהטון לשנה. ללא הכנסה מסיבית של תחנות כוח גרעיניות או סולריות לא יהיה זה אפשרי להוריד את יצירת כמויות ה- CO_2 באטמוספירה.

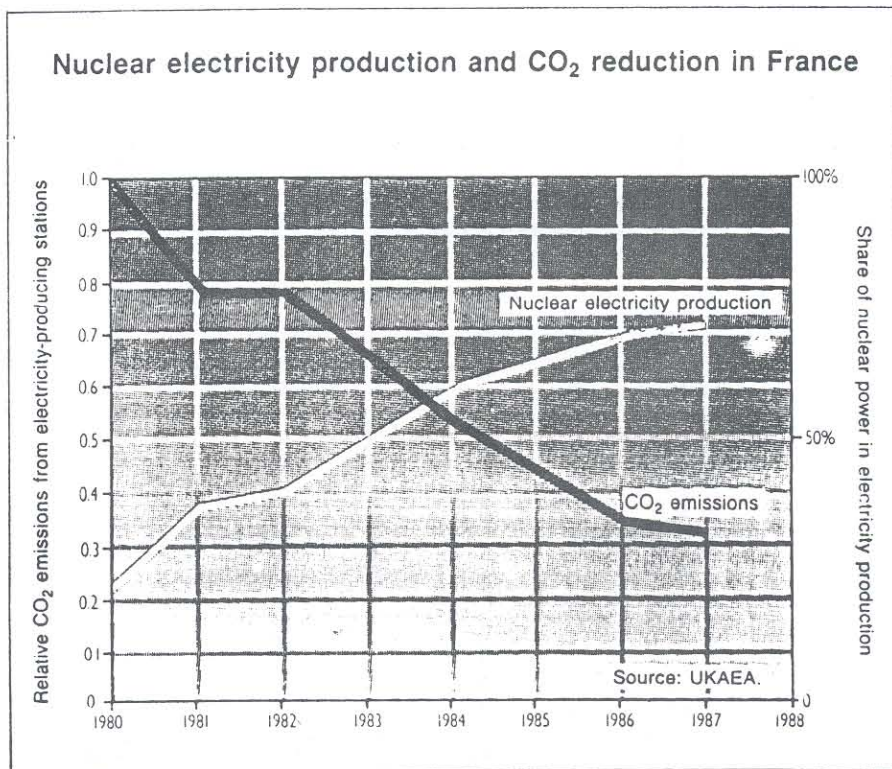
ההשפעה של שינויים אלה בכמויות הגזים באטמוספירה, על הטמפרטורה, נמדדה ונמצא שקיימת הוכחה נסיבתית לכך שהגדלת כמויות גזי החממה באטמוספירה אכן גרמו לחימום גלובלי של האטמוספירה של כדור הארץ. בעקומות המתארות שינויים בטמפרטורות נמדדות על פני כדור הארץ רואים קו מגמה ברור של חימום האטמוספירה.



ההשפעה של הגזים השונים על שינויי טמפרטורה צפויים באטמוספירה ניתנים לחישוב באמצעות מודלים שונים. אחד המודלים מנבא שעד לשנת 2030 תתחמם האטמוספירה במעלה וחצי בערך כאשר תחום הטעות הוא כפולס מעלה מינוס חצי מעלה. מידע זה מופיע בתמונה הבאה.



את ההשפעה הנסיבתית של כורי הכוח על כמויות דו תחמוצת הפחמן המצויות באטמוספירה אשר לאבחן בקלות בשקף 28. השקף מראה שככל שגדל חלק האנרגיה החשמלית המסופק על ידי גרעין בצרפת כן הלכה וקטנה כמות דו תחמוצת הפחמן באויר. התרומה של כורי הכוח לתמונת האקולוגית בעולם נראית ברורה.



אם אכן הננו מאמינים לניבוי של המודלים המנבאים את חימום האטמוספירה, המסקנות לגבי מקומם של כורי הכוח במערך ייצור החשמל העולמי חדות וברורות. כמוכן שיחד עם הורדת ה- CO_2 מסלקים גם NO_x אולם לכך אין לי כרגע נתונים.

לסיכום, הכורים הגרעיניים בהתאם למצבם העכשווי ולתרומתם הממשית לייצוב מחירי החשמל בעצם היותם אנרגיה אלטרנטיבית לאנרגיה הפוסילית, מהווים כבר עתה גורם משמעותי במערך ייצור האנרגיה החשמלית בעולם. בסקירה הקצרה שמסרתי כאן, הזכרתי מספר בעיות הדורשות פתרון. הפתרון יכול להינתן על ידי תכנון חדיש של הכור הגרעיני תוך שימת דגש על היבטים תכנוניים פסיביים, והקטנה עד אפס של סיכויי ההינזקות מכור גרעיני.

מקומם העכשווי של הכורים הגרעיניים במערכת הספקת האנרגיה העולמית יגרום לכך שיותר ויותר מדינות, חברות חשמל וגופים ציבוריים אחראים יגיעו אל המסקנה הבלתי נמנעת שלכורי הכוח יש מקום מכובד ברשימת יצרני האנרגיה העתידיים. ברור שאי אפשר יותר להתעלם מתרומת כורי הכוח למערך ייצור החשמל בעולם ומהיותם נדבך חשוב במערך יצרני האנרגיה כבר עתה. אי אפשר להתעלם מתרומתם הבלתי מעורערת לאקולוגיה ולאיכות האטמוספירה. אי לכך סביר לצפות לכך שהכורים הגרעיניים ימצאו את מקומם בעתיד הלא רחוק כספקי אנרגיה עיקריים ובמספרים החולכים וגדלים במערכי הנארגיה של המדינות המפותחות בעולם של המאה ה-21, אני מקווה שישראל תהיה אחת מהן.

References

- Observation on the nuclear power programs of France and the United States.
Georges Vendryes, Atomic Industrial Forum, Feb. 1986.
- Improved and safer nuclear reactors.
J.J. Taylor, *Science* Vol. 244, pp. 318-325, April 21, 1989.
- Describing advanced design nuclear energy plants.
Ann S. Bisconti and Robert L. Livingston, U.S. Council of Energy Awareness,
Aug. 8, 1989.
- Energy from fossil fuels,
W. Fulkerson, R.R. Judkins and M.K. Sanghvi, *Scientific American*, Sept. 1990,
pp. 83-89.
- Energy from nuclear power,
W. Hafele, *Scientific American*, Sept. 1990, pp. 91-97.
- Status and trends of nuclear energy development ,
International Data File, IAEA. Vienna, Sept. 1990.
- IAEA New Briefs,
Vol. 6 No. 1 (48), Jan/Febr. 1991.
- Annual review of load factor trends,
Laurie Howles, *Nuclear Engineering International*, April 1991.

פצלי שמן כדלק חלופי

אברהם קייזר

מנכ"ל פמ"א

פצלי שמן הם סלע סדימנטלי שגילו מוערך על ידי הגיאולוגים ב-70 מליון שנה. כדי להבטיח שניתן יהיה לעקוב אחר הדברים, יש להזכיר מספר נקודות יסודיות: פצלי שמן הם סלעי סדימנטליים הניתנים לניצול בשני אופנים: מיצוי והפקת נוזל דמוי נפט, ושריפה ישירה לייצור קיטור וחשמל. ההבדל המיוחד את סוג התעשיות שאנו עוסקים בהם הוא סדרי הגודל למעברים. אם מדברים על השלבים של בחינה ראשונית של רעיון תהליכי בסדרי גודל של עשרות אלפי דולרים, כשעוברים לסדרי גודל של מתקנים מעבדתיים שההשקעה היא בסדר גודל של מאות אלפי דולרים לשנה, בתעשייה שלנו כשעוברים למתקנים חרושתיים, מדברים על מליוני דולרים השקעה בסיסית במתקנים. כשעוברים למתקנים הדגמתיים, שזה השלב הבא של הפיתוח, מדברים על עשרות מליוני דולרים. במתקנים מסחריים מלאים, לחומר כה דל אנרגיה כמו שלנו, מדברים על מאות מליוני דולרים.

הפצלים מפוזרים בכל חלקי הארץ, אבל הריכוז הגדול הוא בנגב הצפוני, והמרבץ הגדול ביותר הוא מרבץ רותם ימין, שנקרא בעבר מרבץ אפעה. הפעילות בארץ בתחום פצלי השמן התחילה עוד בימי המנדט, בעיקר פעילות של סקרים. בשנות החמישים והששים היתה פעילות מחקרית, בתחילת שנות השבעים או סוף הששים אחר מרבץ אפעה. בתעשיות מחצבי ישראל (תמ"י) התחילו לעבוד על הנושא באמצע שנות השבעים. משרד האנרגיה הוקם בסוף שנות השבעים ונכנס לנושא זה. משבר האנרגיה באותה תקופה נתן דחף להקמת פמ"א, שהיתה יוזמה של מספר חברות ממשלתיות ומשרד האנרגיה.

מבנה בעלות פמ"א כיום מסתכם בשלוש חברות: החשמל - 50% ושתי האחרות 25% כל אחת. פמ"א נזונה בתקציבי המחקר גם ממשרד האנרגיה, ויעד החברה הוא להביא לניצול כלכלי של פצלי שמן במדינת ישראל.

בתחילת הדרך היה צורך להתמודד במספר עובדות בסיסיות. חומר דל קלוריות, ולכן יש צורך לעבד כמויות אדירות. התחום של כימיה-מחצבים הוא תחום עתיר הון בהשקעות. בכל מקרה בתחומים אלה יש יתרון לגודל וכשצריך לעקוב אחר ההגיון של הדבר יש להזהר מפתויים. יש להזהר לא לרוץ, בגלל היתרון לגודל, למערכות בסיס או למודולים בסיסיים בסדרי גודל גדולים מאד. הגענו למסקנה שאסור לנסות בתהליך הפיתוח לחשוב במונחים של אופטימיזציה כלכלית, אלא במונחים של מיזעור הסיכון, במיוחד במציאות של מדינת ישראל.

ידענו שלמרות שלפצלי השמן יש מרכיב המהווה מכנה משותף בכל העולם והוא הקרוגן, יש הבדל בסיסי בין פצלי שמן במדינות שונות, ולפעמים בין מרבצים שונים באותן מדינות, ולכן כשמישהו אומר שיש טכנולוגיה מוכחת לפצלי שמן, צריך לברר על אילו פצלים מדובר. כשהתחלנו את הפעילות שלנו לא חשבנו להתעלם ממה שקורה בעולם. אבל הבנו במהרה שלא ניתן להעתיק טכנולוגיה מארצות הברית או ברית המועצות אלא בהתייחס לטיב פצלי השמן שלנו. זה בהתחשב בעקרון הראשון, מיזעור הסיכון חייב אותנו לאמץ גישה שבה לא ניתן לדלג על שלבי פיתוח.

לכן, היה צריך לפתח בארץ מיומנות בכל התחומים הקשורים לניצול פצלי שמן. היה צריך להקים מרכז מחקר ופיתוח, שיאפשר באמצעים עצמיים לתקוף את הנושאים של התאמה או של פיתוח עצמי, כך הוקמה קרית פמ"א.

OIL SHALE DEPOSITS AND OCCURRENCES IN ISRAEL



Oil shale deposit



Probable existence of oil shale one based on old water wells data

33°

33°

0 10 20 30 40 Km

by M. Shirav (Schwartz); D. Ginzburg

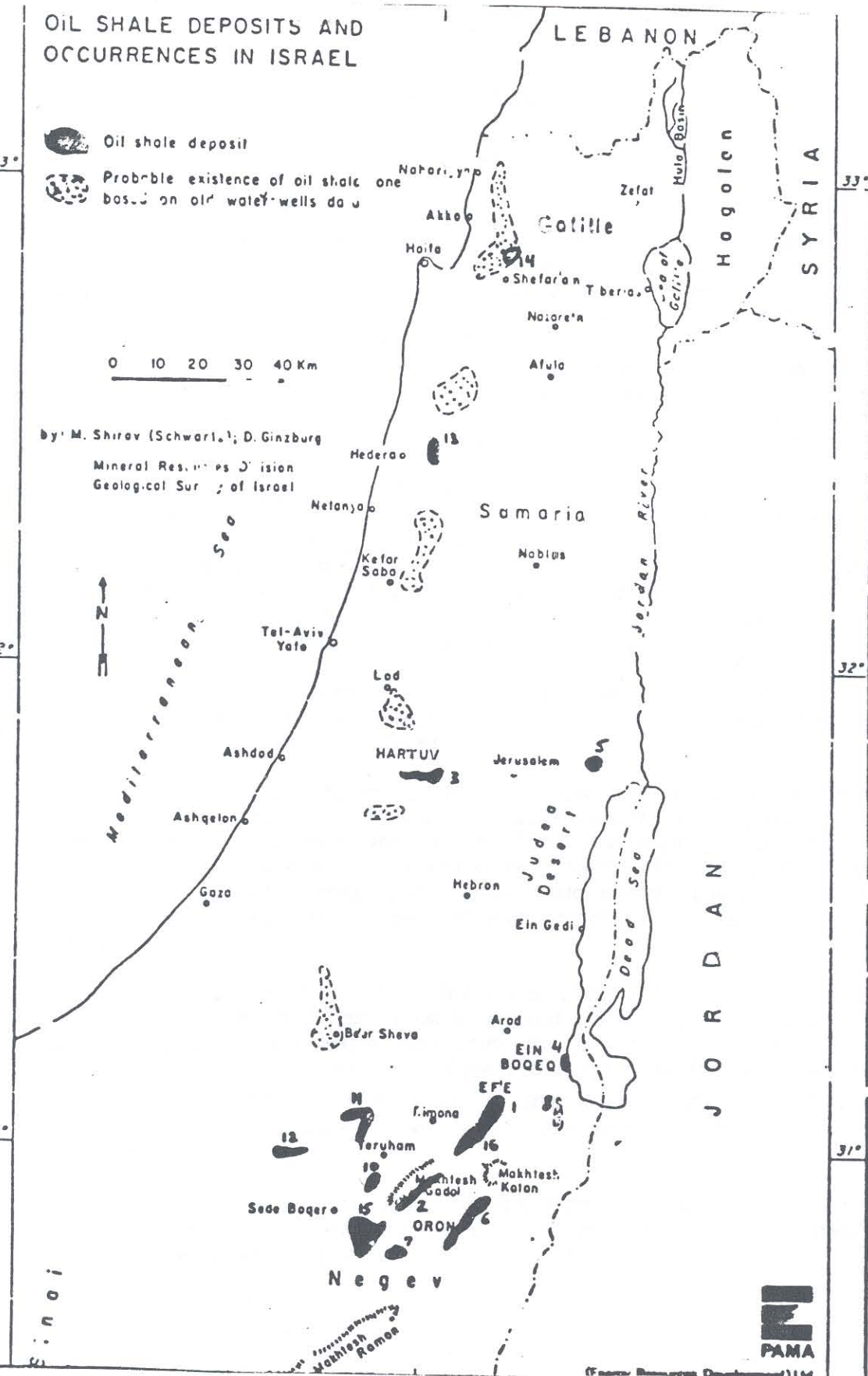
Mineral Resources Division
Geological Survey of Israel

32°

32°

31°

31°



GSI

(From: Resources Department) Ltd.

בתחילה היו בפנינו שני נושאים עיקריים: התאמה או פיתוח טכנולוגיה להפקת נפט, והתאמה או פיתוח טכנולוגיה לשריפת פצלים. שלבי הפעולה היו מאד אופייניים לשלב פעולה של פיתוח, ואין בהם חידוש מבחינת התפיסה הכללית. שלב ההיתכנות שכולל מתקני מעבדה (פילוט), הפעלת מתקנים חצי חרושתיים וסקרי היתכנות. אחר כך שלב הדגמה, הקמה והפעלה של מתקנים כמו-חרושתיים ואז מגיעים לשלב המסחרי.

בשלב ראשון שאלנו את עצמנו ארבע שאלות:

- מהן עתודות פצלי השמן,
- מה התהליכים הטכנולוגיים המאפשרים את ניצולם,
- מה הפוטנציאל הכלכלי,
- ומה עושים אחרי שמקבלים תשובה על שלוש השאלות הקודמות.

איתרנו רזרבות של 12 מליארד טון פצלי שמן, שזה אקוויולנטי ל-600 מיליון טון של נפט גולמי. ישראל צרכה בשנה שעברה קרוב ל-8 מיליון טון נפט גולמי. הוכחנו שיש שני תהליכים שניתנים ליישום טכני, במתקני חלוץ בארץ ובח"ל, בתנאים מסוימים הוכחנו פוטנציאל כלכלי מבטיח והמלצנו להתקדם לשלב הבא.

המרבץ הגדול ביותר ושנחקר הכי הרבה הוא מרבץ רותם ימין. החלק הצפוני נחקר ביותר. מרבץ זה מכיל כ-2.5 מליארד טון והחלק הדרומי כ-5 מיליון טון. רק במרבץ זה מרוכז חלק גדול מהרזרבות המאותרות.

סקר ההיתכנות בתחום הפקת הנפט כלל את השלבים הבאים: הרצת הפצלים שלנו במתקני חלוץ שיצגו שלב פיתוח מתקדם, והרצת האמוצה במתקנים המאפשרים טיוב או שיפור הנפט הגולמי לתזקיקים ברי שימוש. תכנון של היקף כריה בקנה מידה מסחרי, ניסויי גריסה ופעילויות נוספות הקשורות לנושא זה, החל מטיפול בשפכים וכלה בטיפול בגזים וכדומה.

לאחר שיצרנו בסיס נתונים, ניגשנו לסקר ההיתכנות שכלל תכנון של מערך הפקת נפט בגדל גודל של כ-20 אלף חביות ליום. אלה התוצאות שבקלנו בשנת 1984. עבור הפקת 18 אלף חביות נפט, המתקן יעלה קצת פחות ממיליארד דולר. הוצאות התפעול כ-100 מיליון דולר לשנה, משך הייצור 20 שנה. התוצאה הסופית תהיה עלות חבית נפט בין 30 ל-35 דולר לחבית בשיעור נכיון של 12% עבור ההון. זה היה הבסיס להליכה לא למתקן מסחרי, אלא הצדקה ללכת לשלב הבא, שהוא מתקן הדגמתי, או כמו-חרושתית. ב-1984 היו אלה תוצאות מצויינות כי מחירי הנפט הגיעו ל-40 דולר לחבית. כיוון שתהליך קבלת ההחלטות הוא ארוך, וכיון שגישת הזהירות שלנו אומרת שאין לקבל החלטות על סמך התרחשות פוליטית חולפת, הסתכלנו לאורך זמן מה על המחיר האלטרנטיבי של נפט והגענו למסקנות שאציין להלן.

התוצאות היו, מכל מקום, שמצאנו טכנולוגיה שבאמצעותה ניתן להפיק נפט (תהליך Paraho). לנפט גולמי זה ניתן לעשות שיפור בעזרת מימן למוצר בעל איכות גבוהה, כמעט בלי שארית כבדה, שזה יתרון לנפט גולמי, באמצעות קטליזטורים קונבנציונליים, ומצאנו גם שמחיר הפצלים במדינת ישראל הוא היתרון הגדול ביותר שיש לנו: זה זול.

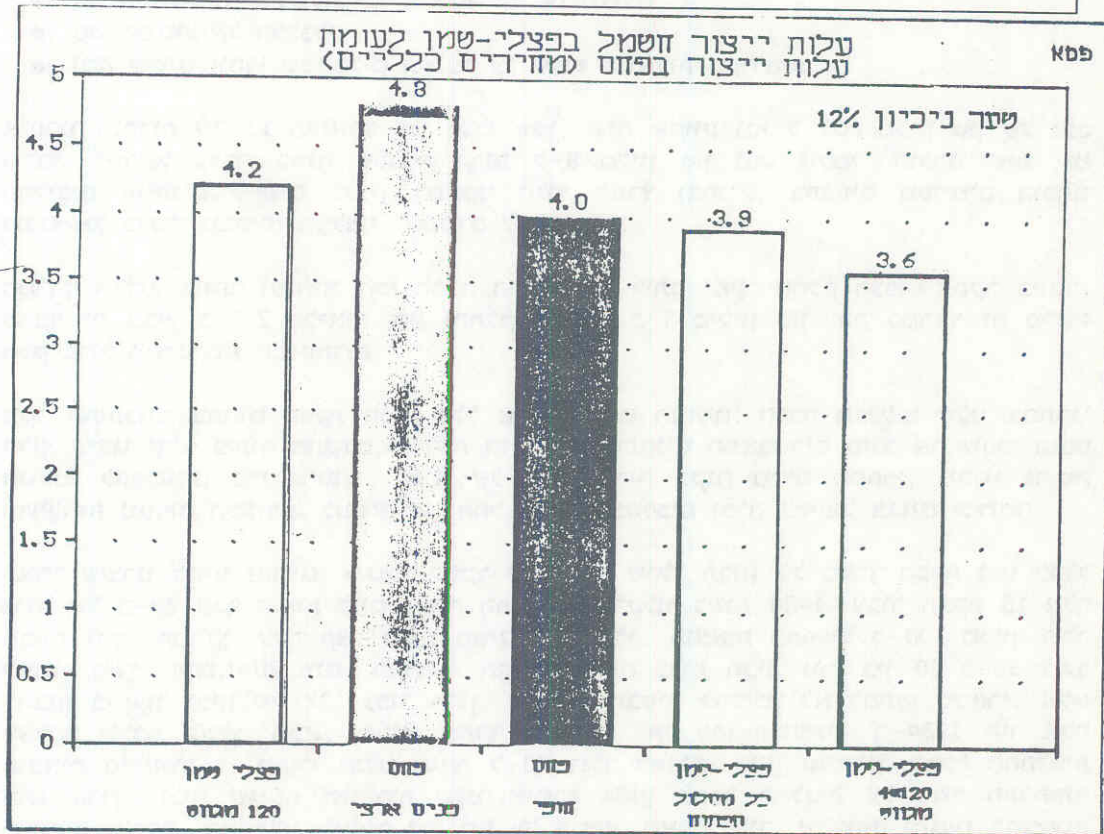
לאור ממצאים אלה המלצנו ללכת למתקן הדגמה. בו זמנית עבדנו על נושא השריפה, כי שריפה או יכולת שריפה בקנה מידה גדול הוא תנאי הכרחי להפקת נפט מפצלים בכל מקרה, אך לא להפך. הסיבות שבגללן הלכנו לפיתוח יכולת שריפה קשורות בניצול הנפט עצמו. העובדה שהפצלים שוכנים בסביבה בה יש מפעלים עתירי אנרגיה. כמו כן כשיש כמויות כאלה של פצלי שמן, האפשרות של ייצור חשמל מפצלי שמן לא היתה חסומה בגלל מגבלות כמות. כשהתחלנו לעבוד על הנושא בסוף שנות השבעים אמרו שכיון שיש לנו כמות קטנה של פצלים נייחד אותה להפקת צורת האנרגיה האצילה יותר - דלק נוזלי אבל בינתיים הסתבר שזו לא מגבלה.

הפקת חשמל מפצלים - חישוב כלכלי

פחם ערך קלורי נמוך 6125 קק"ל/קג' \$50 - 60
 פצלים ערך קלורי גבוה 700 קק"ל/קג' \$2.5
 מחיר לטון

מחיר הפצלים במונחים שרי ערך לפחם:

$$2.5 \frac{6125}{700} \frac{39}{29} \approx \text{\$/טון} \approx 30$$



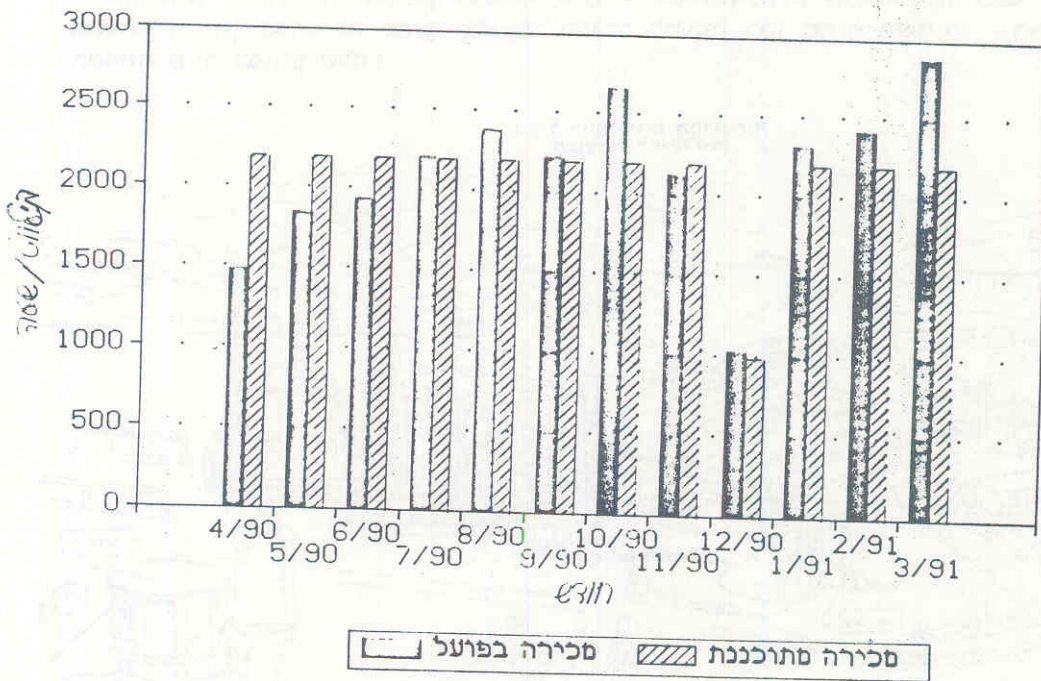
ההגיון הכלכלי: פצלי שמן הם פחם ישראלי שעלותו 30 דולר לטון אקויוולנט לעומת דלק פוסילי מיובא שעלותו כ-60 דולר. השאלה המרכזית היתה האם הפער הזה בעלויות מחירי דלק לא ייסגר בגלל השקעות גדולות יותר במתקנים הנדרשים בתהליכים של פצלי השמן ולעלויות התפעול הנדרשות. 30 דולר לטון מיצג את העלות האקויוולנטית שוות ערך לטון פחם. כמות הפצלים שאתה צריך לכרות, כ-10 טון פצלים, כדי שיהיה לך ערך אנרגטי שווה ערך לטון פחם. אם פחם מיובא עולה בין 50 ל-60 דולר, הרי לכרות אותה כמות ולהביאה לתחנה עולה 30 דולר בלבד. עשינו תכנון של מערך של 600 מגוואט ואלה התוצאות בהשוואה לפחם, בערך ניכיון של 12%. התוצאה היא די ברורה. פחם בלי קולטני, חופי, הוא זול במקצת או משתווה פחות או יותר לפצלי שמן. לפצלי שמן יש יתרון מסוים, אם נצטרך לבנות תחנות כוח פנים ארציות בפחם. ברמה הזאת של הדיון ושל העבודה, ההמלצה לא היתה לבנות תחנות כוח של פצלי שמן, אלא להתקדם בזהירות הלאה.

נצילות תחנות כח לפצלי שמן הרבה יותר קטנה, יחסנו ל-72 אחוז, בגלל קירור באויר. בסוף 1985 שאלנו את עצמנו כיצד ממשיכים ללכת לנוכח ירידת מחירי הדלק הנוזלי והעובדה שהטכנולוגיה בתחום המיצוי היתה פחות מפותחת מאשר בתחום השריפה. הוחלט שהולכים ומרכזים מאמץ בפיתוח יכולת שריפה בקנה מידה גדול. נשאר לנו ללכת למתקן



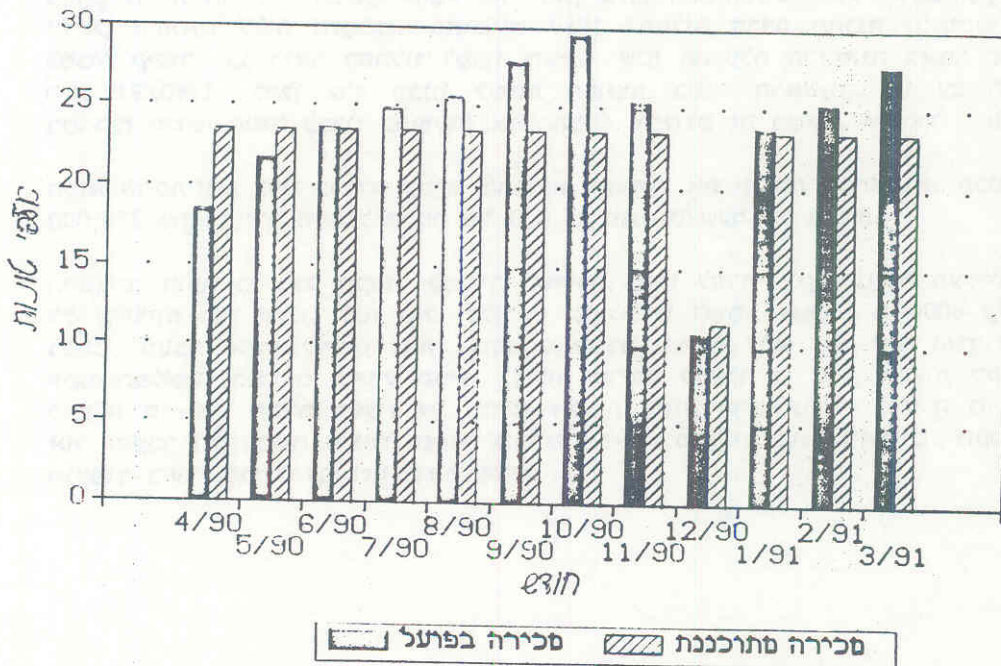
מכירת חשמל

השוואה בין התכנון ליישום



מכירת קיטור

השוואה בין התכנון ליישום

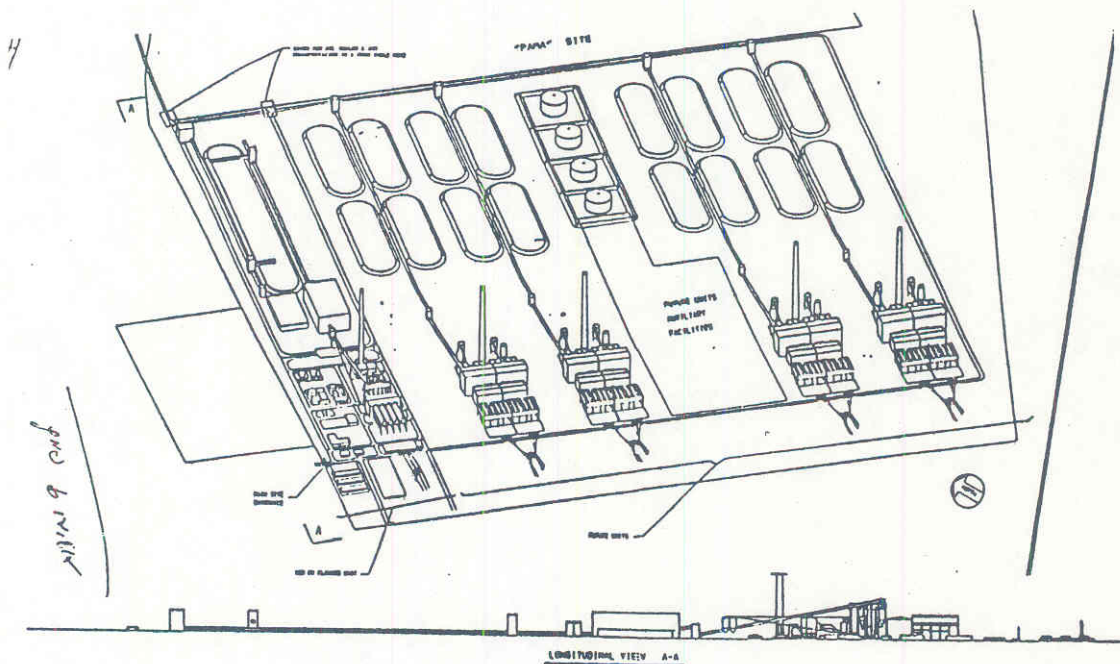


היום אנו עומדים עם מתקן הדגמה מוצלח ותכנית נפט שנתקעה אי שם באמצע. בתחום הנפט הגענו למיצוי הפוטנציאל של מתקני החנות שלנו וחייבים לעבור למתקנים יותר גדולים. אנו מתכוונים ללכת להקמת מתקן הדגמה בגודל 200-300 חביות ליום, או הקמת מתקן חצי-חרושי גדול במצע מרחף. הראשון זו טכנולוגיה שרכשנו בזמנו והשני פרי פיתוח מקורי. המסלול השני הוא ארוך יותר. כדי להגיע לאותה רמת פיתוח כמו במסלול הראשון צריך לעבור עוד מתקן חצי חרושי גדול בדרך. יש לנו גם החלטה אסטרטגית להתמקד בהמשך התהליך, כלומר במוצרים עצמם. יש היום תהליכי קטליזה מתקדמים היכולים להגדיל משמעותית את כמות התזקיקים העליונים שניתן לעשות בתהליך הטיוב של הנפט, ויש אפשרויות להשתמש בנפט הפצלים לפחות פוטנציאלית למוצרים לא אנרגטיים כפי שעושים ברית המועצות.

בתחום השריפה נמשיך להפעיל את המערך ההדגמתי. אנו נמצאים בשלב של קדם פרויקט עם חברת החשמל להקמת תחנת כוח בת אלף מגוואט. המודול הראשון, 120 מגוואט, צריך להיות מוקם לפי לוח הזמנים ב-1996. אנו נספק לחברת חשמל ידע ונשמש כיועצים. פמ"א תהיה ספקית חומר הגלם, גרוס מעובד לפי מפרטים, ואנו נמשיך לפעול להקמת תחנות כוח תעשייתיות באזור. יש בדיקה של רעיון לייצר מגנזיה מים המלח. לא רעיון חדש אבל אולי עכשיו יהיה כלכלי, תלוי במחירי הארנג'יה.

דיברנו על אפשרות שפמ"א תספק אנרגיה זולה, ופה מדובר על מפעל מאד אינטנסיבי בצריכת האנרגיה שלו. נמשיך לשתף פעולה עם פוספטים בנגב, שהוא המפעל הקרוב אלינו, בכל הנגוע לניצול פוספט ביטומני, ונמשיך במאמץ לשווק אפר פצלי שמן. יש היום כבר מוצר בשוק המבוסס על אפשר פצלי שמן הנקרא קיט-קיט - מצע לחתולים. מדובר על מכירת החומר באירופה בעשרות אלפי טונות לשנה. הדבר נשמע קצת משונה לעומת הכמויות המסיביות של חומר גלם שמדברים עליהן, אבל מדובר במאות אלפי דולרים לשנה רווח לפמ"א.

בציור נראה אתר תחנת הכוח הבאה, בהתייחסות לקרית פמ"א. זה אתר המיועד ל-1000 מגוואט, מדובר על פוטנציאל עצום - 10 מיליארד טון פצלי שמן יכולים להספיק למלוא צריכת האנרגיה החשמלית של מדינת ישראל ברמתה הנוכחית ל-160 שנה. אין מגבלה כמותית. המגבלה היחידה היא אם נוכיח שניתן לעשות זאת בצורה כלכלית. אנו הצבנו יסוד שנותן הרגשה טובה או בטחון שהדבר ניתן להשגה בשנים הקרובות.



חיסכון באנרגיה בבנייני מגורים

פרופ' מ. פורה

קיים פער גדול, בסדר גודל של 1:3, בין ההערכות של צריכת אנרגיה בבניינים, לחימום וקרור, ובין הצריכה בפועל. ניתוח מראה כי הסיבה העיקרית לפער זה היא העובדה, שהציבור הישראלי כבר חוסך באנרגיה. קשה, כמובן, לחסוך את אותה אנרגיה פעמים. מסקנה שניה היא, שבמקרה הטוב ביותר מדובר בחיסכון אפשרי באנרגיה לחימום בסדר גודל של כמה מאות דולרים, לשנה לדירה, בלבד. לכן, על אף החשיבות הרבה של חיסכון זה, יש להיזהר מהשקעות מיותרות לשם השגתו, כמו הוצאות ליועצים ומומחים או תוספת חלונות לקליטת אנרגיה סולרית, שיעילותם יורדת ככל ששטחם גדל.

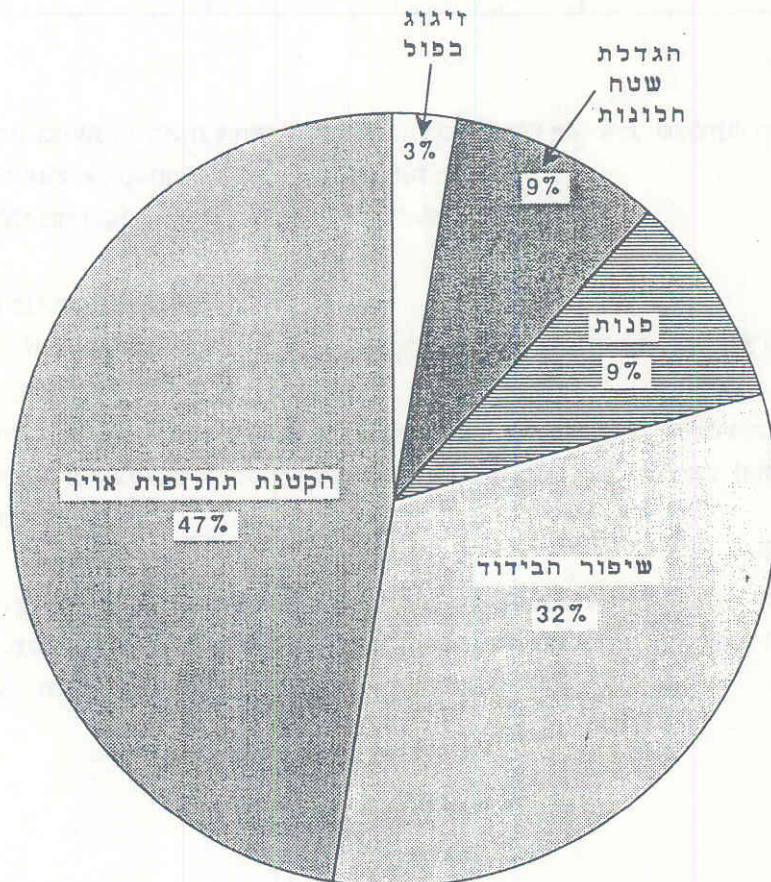
כיצד אנו חוסכים, וכיצד להמשיך ולעודד חיסכון ?

- הסתפקות ברמת נוחות נמוכה
- חימום / קרור איזורי ולסרוגין
- שיפור מעטפת הבניין
- יעול מתקני החימום/קרור
- שימוש באנרגיה סולרית לחימום/קרור
- צימצום בהשקעת משאבים לחימום/קרור.

ההרצאה סוקרת את הפוטנציאל של האופציות השונות לחיסכון. ניתוח אופציות החיסכון התיאורתי היחסי של בנייה משמרת אנרגיה מופיע בציר 1. השוואה מקורבת של תשואות ועלות מופיעה בטבלה 2.

פוטנציאל החיסכון באנרגיה

מחושב לדירה בירושלים עם חדירת אויר גבוהה



טבלת יעילות ועלות של אמצעים לחיסכון באנרגיה בבנינים

השפעות לואי	עלות	יעילות קיץ	יעילות חורף	האמצעי
זהום אויר	אפסית-גבוהה	+++	+++	מניעת הסתננות אוויר-איטום
מניעת עיבוי	בינונית-גבוהה	+	++	בידוד מעטפת

תכנון סולרי פאסיבי

פנות	אפסית-גבוהה	+++	++	
הגדלת שטח זיגוג דרומי	בינונית-גבוהה		++	
הקטנת שטח זיגוג מזי/מעי	בינונית-גבוהה	+++	- +	
מתקנים מיוחדים-טרומב	גבוהה	--	+	
זיגוג כפול	גבוהה	+	+	מניעת רעש

שיפור תנאי נוחות בקיץ

אוויר קיץ טבעי	+++	נמוכה	מניעת מזגן
מאווררים		+++	נמוכה
מניעת מזגן			
הצללת פתחים	+++	בינונית	
תאורה טבעית	+	בינונית	אוריות חלל
תאורת הלוגן	-		אוריות חלל

מסקנות הניתוח:

הדרך היעילה ביותר היא: מניעת הסתננות אוויר על ידי איטום באמצעים פשוטים, שעלותם קטנה. הישראלי הממוצע חסכן ואחראי, כשהוא מבין כיצד להשיג את החיסכון. הוא נוטה להשקעות בלתי מוצדקות (הנסיון האינפלציוני, קל לשכנוע) יש לעודד:

- איטום בניינים באמצעים פשוטים.
- תכנון סולרי פסיבי מתון וכלכלי, בעיקר באמצעות בחירת פנות דרומית בשלבי התכנון.
- שימוש באוויר טבעי ומאווררים.
- שינוי התקן הישראלי לבידוד ולחלונות, מאחר ואינו מתייחס לתכנון הסולרי הפסיבי.
- ריסון השקעות לא כלכליות בשיפוץ (לחיסכון באנרגיה בלבד) ובמיוזג אויר (בתנאים בהם ניתן להסתפק באוויר).

פרטים מלאים על תכנון סולרי פסיבי מתון מופיעים בספר: "עקרונות וכללי תכנון לבניה סולרית פסיבית של בנייני מגורים בישראל" מאת מ. פורה, ש. חסיד, ד. אבן-אור, ד. וגנר, וס. ביכיו, בהוצאת משרד האנרגיה. הספר מופץ ע"י מרכז הבניה, ת"א..

תכנון אדריכלי מודע לאנרגיה

פרופ' עדנה שביב

הפקולטה לארכיטקטורה - הטכניון, חיפה

מבוא

תכנון אדריכלי מודע לאנרגיה מתייחס לאספקטים השונים של התכנון האנרגטי הכולל. במסגרת זו נכלל הנושא של תכנון מודע לאקלים ותכנון סולרי פסיבי. במאמר זה אנסה להסביר מהו תכנון אדריכלי מודע לאנרגיה ואקלים ומהו תכנון סולרי פסיבי משמר אנרגיה. אציג את כלי התכנון העומדים לרשות האדריכלים כדי לבצע תכנון אנרגטי נכון של מבנים. כלים אלו כוללים מצד אחד מודלים לסימולציה שעתית מדויקת המיועדים להעריך את רמת הביצועים התרמיים של פתרון ספציפי כל שהוא. מצד שני כוללים כלי התכנון חוקי אצבע והמלצות כלליות שמאפשרות לקבל החלטות תכנון בצורה טובה כבר בשלבים הראשונים של התכנון. לבסוף, תוצג מערכת מחשב משולבת שפותחה על ידינו בפקולטה לארכיטקטורה, המבוססת על חוקי אצבע המתאימים למקרה הכללי ועל סימולציות שעתיות מדויקות, על מנת לבדוק את המקרה הספציפי.

תכנון אדריכלי סולרי-פסיבי מודע לאנרגיה ואקלים

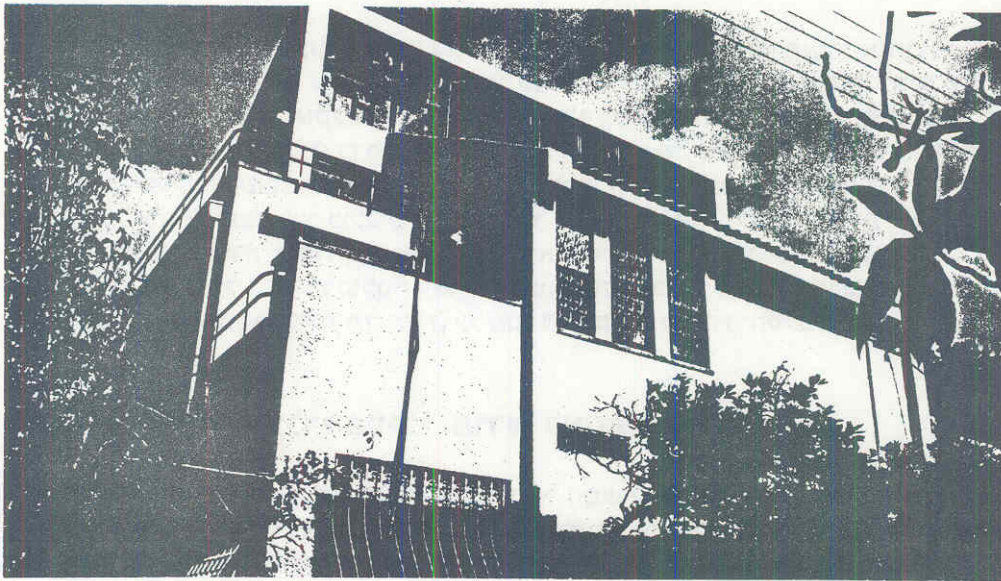
בתכנון אדריכלי סולרי-פסיבי הבנין עצמו הוא המערכת הסולרית. קליטת האנרגיה הסולרית ואגירתה מתבצעת על ידי אלמנטי הבנין השונים. חלונות, או חממות, הפונים לכיוון דרום מהווים את אלמנט הקליטה, ואילו חומרי הבניה הכבדים, כמו רצפה ותקרות מבטון וכן קירות הבנויים מבלוקי בטון, יכולים לאגור את האנרגיה שנקלטה בבנין. יש צורך כמו כן לבודד את מעטפת הבנין ולאוטמו כראוי כדי לשמר את האנרגיה שנקלטה או שסופקה לבנין באמצעים מלאכותיים.

מכיון והבנין הוא המערכת הסולרית, תכנון אדריכלי מודע לאנרגיה לא ניתן להשגה בצורה מוצלחת רק ע"י תוספת בידוד לבנין, שתוכנן בצורה גרועה. יש צורך כבר בשלב התכנון הרעיוני, לתכנן את הבנין כך שיוכל לתפקד כמערכת סולרית, החל בתכנון הכללי של הבנין והאורינטציה שלו, וכלה בחומרי ופרטי הבנין וסידור הפנים. יש להתייחס לתנאי אקלים המקום ולאספקט של שימור האנרגיה כבר בראשית התכנון ולא לנסות לפתור בעיות בצורה מאולתרת, שנוצרו ע"י תכנון לקוי מבחינה אקלימית.

בנין סולרי פסיבי צריך ויכול לתפקד גם בקיץ כבנין משמר אנרגיה וכמערכת פסיבית לקירור. בחלקים שונים של הארץ, בהם קיים אקלים ישראלי ים-תיכוני, אין הצדקה בהרבה מקרים למערכת מיזוג אויר מכנית. זאת מכיון וניתן להשיג תנאים אקלימיים נוחים בתוך הבנין באמצעות תכנון נכון. בכרמל לדוגמא, שם טמפי השיא הממוצעת לאוגוסט היא כ- 28 מע', ניתן להשיג תנאי נוחות אקלימיים בתוך הבנין באמצעות תכנון נאות של הבנין, כגון:

- הצללת חלונות בעזרת מגיני שמש היצוניים (כמו תריסים) שימנעו חדירת קרינת שמש ישירה לבנין.
- תכנון מסה תרמית בבנין בכמות המספיקה להשגת השהיית הטמפרטורה המקסימלית בתוכו בערך של כ-6 שעות ביחס לטמפי המקסימלית בחוץ. בתנאי כזה מגיעה הטמפרטורה בפנים הבנין לשיאה בערב, כאשר הטמפי בחוץ היא כבר נמוכה.
- צינון המסה התרמית במשך הלילה ע"י איזורר הבית בשעות אלו.

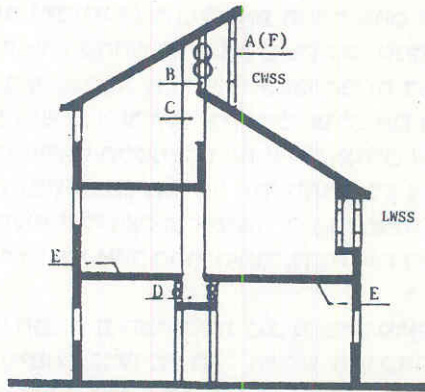
בתמונה 1 מוצג בנין סולרי פסיבי שנבנה בכרמל בשנים 82-1981. בית סולרי פסיבי זה מהווה שיפור סולרי-אנרגטי של בית חד-קומתי בן שלושים שנה. הבית המקורי היה בן 100 מ"ר והוספה לו קומה שניה וגלריה המהווה יחידה חד-משפחתית בשטח המגיע ל-180 מ"ר. בדומה למרבית הבנינים מתקופתו בחיפה, נבנה הבנין מקירות חוץ מבטון דבש שעוביים 20 ס"מ ללא בידוד כלל. קירות הבטון היו מכוסים משני צידיהם בשיכבת טיח דקה. הבית הישן נזקק לשיפוץ, במיוחד לטיפול מחודש בטיח החיצוני והוספת בידוד. לכן הפתרון הטבעי היה להוסיף בידוד חיצוני ולהפוך את קירות הבטון למסה תרמית.



תמונה 1: החזית הדרומית של הבית הסולרי פסיבי בכרמל. שים לב שהקומה הראשונה (שהיתה קימת) מוצלת על ידי הבית הסמוך.

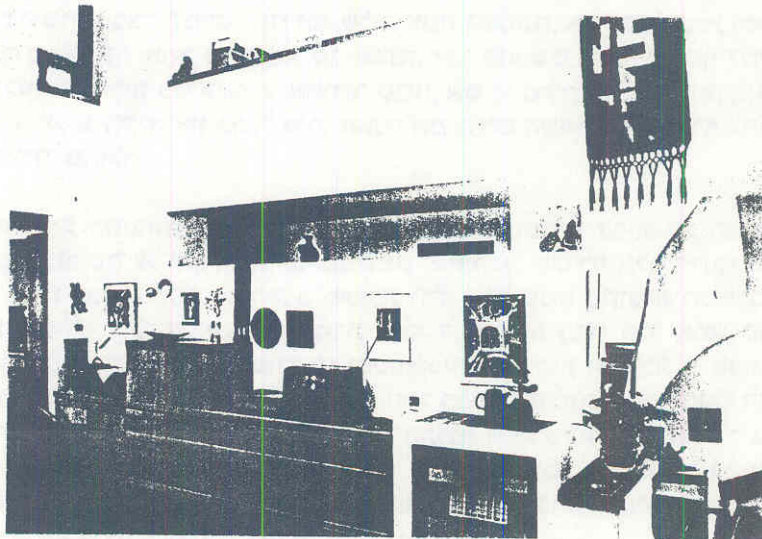
מאחר והמרחק בין הבית השכן מדרום לבית זה הוא 7 מטרים, מרחק אופייני בין צידי בנייני מגורים הנמצאים ברובעים צפופים של העיר, נמצא שהקומה הראשונה הקיימת מוצלת ברובה ע"י הבנין הסמוך בתקופת החודשים דצמבר וינואר כשם שניתן לראות בתמונה 1. הקומה הנוספת החדשה היתה צריכה לספק לכן את האנרגיה הסולרית לכל הבית. מסיבה זו בניית הקומה השניה עם הגלריה כללה תוספת של 18 מ"ר זיגוג דרומי חדש, ולקומה הראשונה הקיימת נוספו רק 5 מ"ר של זיגוג דרומי באותו קטע חזית שהינו פחות מוצל ושימש קודם לכן מרפסת פתוחה.

הזיגוג הדרומי במקרה זה נבנה כמערכת חלון חממה מרכזי, שנקרא לה מערכת חלל שמש מרכזית (ראה תמונה 2). מערכת זו ממוקמת בין שני הגגות המשופעים על מנת להשיג חשיפה מירבית לשמש. מערכת חלון חלל השמש המרכזית נעזרת בחלונות מחליקים אנכיים (חלון A בתמונה 2). חלונות אלה חשופים לשמש בחורף וסגורים. בקיץ הם פתוחים. את חלל השמש מצידו הפנימי סוגרים חלונות הנגררים אופקית (חלון B בתמונה 2). חלונות אלו מאפשרים חדירת אור יום אל תוך חדר המגורים. חלון B בקצהו האחד של חלל השמש, הפונה לגרם המדרגות, מוחזק פתוח משך כל החורף. חלון זה משמש כונס אויר אל תוך חלל השמש. בקיץ חלונות אלה מוצלים לגמרי ע"י הגג שבין חלונות A ו-B, כתוצאה מגיאומטרית הבנין היוצרת הצללה עצמית. ארובת בניה אנכית עם מפוח גדול ממוקם בקצה חלל השמש הרחוק מגרם המדרגות וחלון B הפתוח. במשך החורף האויר החם מסוחרר למטה מחלל השמש המרכזי לאזור חדרי הילדים וההורים שבקומה הראשונה דרך ארובת הבניה האנכית (ראה תמונה 3). סחרור האויר נעשה ע"י המפוח שמופעל אוטומטית באמצעות תרמוסטט דיפרנציאלי. האויר חוזר לחלל השמש דרך חלל המדרגות וחלון B הפתוח.



- A - חלונות חיצוניים מחליקים אנכית
- B - חלונות פנימיים מחליקים אופקית
- C - ארובת בניה אנכית
- D - מנורה אופקית
- E - מסה תרמית
- 8 - מפוח גדול
- 8 8 - מפוחים קטנים

תמונה 2: מערכת חלון חלל שמש מרכזית.



תמונה 3: מבט על ארובת הבניה האנכית דרכה מוזרם האוויר החם מחלל השמש העליון לחדרים שבקומה א'. דרך חלל גרם המדרגות חוזר האוויר אל חלל השמש העליון.



תמונה 4: תעלת בניה אופקית המובילה את האוויר החם אל שלושת חדרי השניה שבקומה הראשונה.

תעלת בנייה אופקית (תמונה 4) מובילה את האויר החם לשלושה חדרים בקומה הראשונה. בחיבור בין תעלה זו לבין כל אחד מהחדרים נמצא מפוח קטן שניתן להפעלה ידנית. בזמן עבודתו של המפוח הגדול משמשת מרבית אנרגיית השמש לחימום המסה התרמית של קירות הארובה והתעלה. שם האנרגיה נאגרת לשימוש מאוחר יותר בחדרים. אולם אם הטמפרטורה בחדרים נמוכה בשעות זריחת השמש, מופעלים המפוחים הקטנים ידנית ע"י האנשים שבחדר. במקרה זה מועבר רוב האויר החם (המסוחר מחלל השמש שבגג) מיד אל תוך החדר. בקיץ קימת אפשרות לפתוח את התעלה לאויר החיצוני דרך חלון עליון שבקומה הראשונה. בזמן הפעלת המפוח הגדול בלילות הקיץ ניתן לצנן את המסה התרמית ישירות ע"י אויר החוץ העובר דרכה, עם הפרעה מזערית לדיירים.

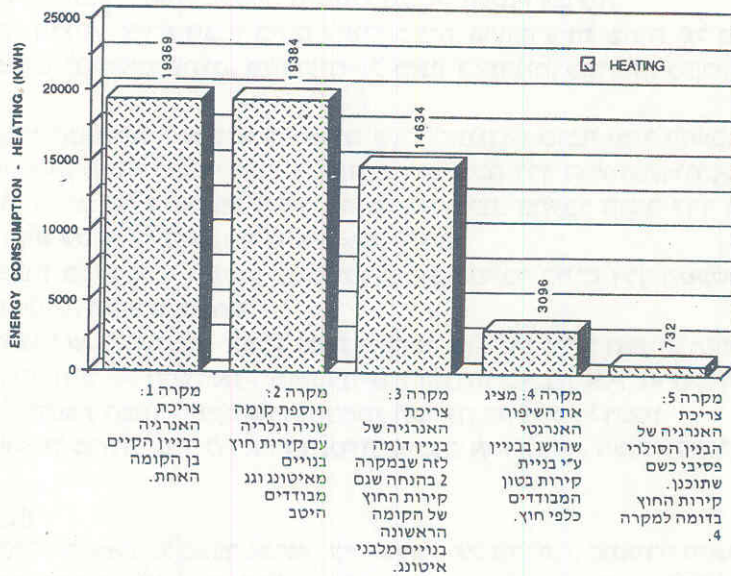
מערכת חלון השמש המרכזית הממוקמת בגג, נמצאה מועילה מאוד בקיץ. כנפי חלונות A המחליקות אנכית מאפשרות שימוש במערכת חלל השמש המרכזית כארובה תרמית להגברת תנועת האויר בתוך הבית בשעות הערב בהן בדרך כלל אין משב רוח בקיץ לאורך שפלת החוף. כאשר החלונות החיצוניים A ממוקמים בנקודה מרכזית, נוצר סחרור אויר טבעי הגורם לתופע ונטורי. כתוצאה מתקבלת יניקת אויר ומשב רוח בתוך הבית. בלילות תופע הארובה התרמית אינו יעיל, אולם אם כל החלונות העליונים פתוחים בצד הצפוני והדרומי של הקומה העליונה, אנו נקבל תופע רגיל של ארובת רוח אשר שוב יגרום ליניקת אויר מהקומה הראשונה. אנו מוצאים שלקיץ עדיף למקם את חלל השמש בחלקו העליון של הבית כדי לאפשר איזורור טבעי, אם כי בחורף עדיף שיהיה בחלקו התחתון של הבית. כאשר בלילות הקיץ אין בכלל רוח, אותם המפוחים המשמשים בחורף להורדת האויר, יכולים לשרת לאיזורור מאולץ.

ארבע מערכות סולריות פסיביות המבוססות על יחידת חלון, תוכננו לבית זה, המערכות הן: א. מערכת חלון דרומי המבוסס על עקרון של קרינת שמש ישירה. ב. מערכת חלון דרומי המבוססת על עקרון של קרינת שמש בצורה בלתי ישירה. ג. מערכת חלון חלל שמש מקומית המשלבת עקרון של קרינת שמש בלתי ישירה, חלל שמש וקיר אגירת חום. ד. מערכת חלון חלל שמש מרכזית (1,2). בחרתי להציג כאן דוקא את המערכת המורכבת והספציפית יותר כיון ומערכת זו מציגה בברור את השלוב הקיים בין שיקולי התכנון האדריכלי השונים החל מפונקציונליות וארגון חללי הבנין השונים, וכלה בפרטי פתיחת חלונות וקירות המבנה עם שיקולי התכנון המודע לאקלים ואנרגיה בקיץ ובחורף. דרך דוגמא זו אפשר להבין מדוע קיים הצורך בכלי תכנון כלליים המאפשרים בחינת כל מקרה ספציפי מחד, ובהמלצות כלליות, בצורת חוקי אצבע, המאפשרים הכוונת המתכנן בבחירת הפתרונות המועדפים כבר בראשית עיצוב עקרונות התכנון והפתרון המוצע.

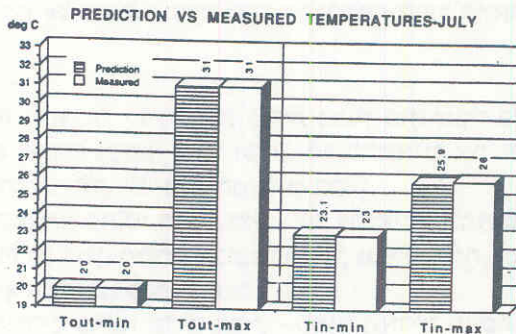
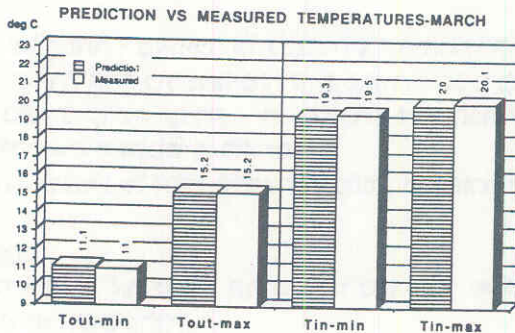
תהליך התכנון כלל הערכתן של כ-50 חלופות תכנון. בכל ההערכה נבדקה מידת השפעתם של פרמטרי תכנון שונים על רמת הביצועים התרמיים של הבית בחורף ובקיץ. פרמטרים שנבחנו כללו את עובי הבידוד הדרוש בקירות החיצוניים, בגג ובמסד, כמות המסה התרמית, כמות וסוג הזיגוג בכלל והזיגוג הדרומי במיוחד, מקדם ההצללה וקצב האיזורור הדרוש בקיץ. מודל לחיזוי התנהגות בניינים מבחינה תרמית שפותח ע"י שביב ו-שביב (3-5) שימש ככלי להערכת כל חלופה. חלופת התכנון שנבחרה לביצוע כוללת שטח ריצפה גדול כמעט פי שניים מהבניין הקיים, אך צורכת ארבעה אחוז בלבד מהאנרגיה שהיתה דרושה לבנין הישן הלא-סולרי וללא הבידוד (ראה תמונה 5). בהשוואה לבית מבודד היטב, אך לא סולרי, הבית הסולרי שנבנה חוסך כ-76% מהאנרגיה הדרושה לחימום. נציין שחיסכון של 50% מהאנרגיה הדרושה לחימום המבנה ניתן בנקל להשגה.

הבית הסולרי הפסיבי תיפקד יפה בחורף כמו גם בקיץ. דרושה רק מעט אנרגיה נוספת לשמור את הבית בטמפרטורה נוחה משך החורף ולא דרושה כלל אנרגיה לשמור על קרירות הבית בקיץ (ראה פרטים במקור 2). מדידות להערכת ביצועי הבנין התנהלו במשך שנת האיכלוס הראשונה. ביצועים אלו של הבנין שנמדדו נמצאו בתיאום טוב עם ביצועיו של הבית אותם ניבא מודל הסימולציה (תמונה 6). המסה התרמית נמצאה חשובה מאוד לביצועי הקיץ של הבית, יחד עם הצללה בחוף מהשמש ואיזורור טוב. כן ניתן להשיג טמפרטורה נוחה בבנין ללא מיזוג אויר. מערכות החלונות שתוכננו עבור בנין זה נמצאו כתואמות את האקלים על שפת הים התיכון, הודות למאפייניהן המשותפים, והם: פשטות בבנייה ובהפעלה, התאמה לשימוש בחורף ובקיץ והארת הבנין באור יום.

ברצוני לציין שבניגוד לבנינים משמרי אנרגיה שאינם סולריים, בהם הושם הדגש על תכנון חלונות קטנים וחללים סגורים ונמוכים (הגורמים לחדרים להיות חשוכים ומשמעמים), הארכיטקטורה הסולרית פסיבית הגדילה מחדש את החלונות הדרומיים ופתחה את החללים על מנת לאפשר הסעת חום טבעית מאזור הקליטה לאזורים רחוקים יותר. הארכיטקטורה הסולרית מעשירה לכן, את חלל הבית ושוטפת את תוך הבנין בתאורה טבעית נפלאה (תמונות 3,4).



תמונה 5: לוח השוואה בין צריכת האנרגיה לחימום של מספר חלופות תכנון.



תמונה 6: הביצועים האנרגטיים של הבנין הסולרי בחורף ובקיץ והשוואתם עם תוצאות הסימולציה.

פרמטרים תכנוניים המשפיעים על צריכת אנרגיה בבנינים

הפרמטרים התכנוניים המשפיעים על צריכת האנרגיה בבנינים הם רבים וכוללים את הנושאים הבאים:

1. מעטפת הבנין -

- א) שטח מעטפת הבנין - שטח מעטפה מינימלי מקטין הפסדי אנרגיה.
- ב) אוריינטציה הבנין - צורת הבנין ביחס לאוריינטציה. פרופורציות שונות של מעטפת הבנין ובעיקר הפתחים הפונים לכיוונים שונים, משפיעים על מאזן האנרגיה, כתוצאה מקרינה קצרת גל החודרת לבנין.
- ג) החומר ועובי המעטפת - שימוש בחומרים בעלי התנגדות טובה יותר למעבר חום, או עובי יותר גדול של המעטפת, משנה הפסדי אנרגיה כתוצאה מהולכה דרך המעטפת, ומקטין את סכנת העיבוי. כמו כן קיבול החום של המעטפת החיצונית גורם לעיכוב במעבר החום דרך המעטפת וכתוצאה - הבנין פחות רגיש לשינויים קיצוניים בתנאי אקלים חוץ.
- ד) סדר השכבות במעטפת - משפיע על גודל העיכוב במעבר החום דרך המעטפת. השיכבה הכבדה צריכה לפנות פנימה והבידוד החוצה.
- ה) הצבע החיצוני של המעטפת - קובע כמות הקרינה הנבלעת בקיר ואת הכמות המוחזרת.
- ו) טקסטורה חיצונית של המעטפת - משפיעה על התנגדות שיכבת אויר החוץ, הצמוד לקיר.
- ז) הצללה על מעטפת הבנין - מקטינה את כמות הקרינה הנופלת על הבנין.
- ח) הגנת המעטפת מרוח - מגדילה את התנגדות שיכבת אויר החוץ, הצמוד לקיר.

2. פתחים בבנין -

- א) שטח פתחים - משפיע על מעבר אנרגיה ע"י הולכה ועל הקרינה, התאורה והאיורור החודרים לבנין.
- ב) מקדם ההתנגדות התרמית של החלון - עובי הזכוכית, מספר הזכוכיות בחלון ועובי האויר המפריד בין הזכוכיות. התנגדות תרמית של חומר מסגרת החלון. תריס ווילון מגזילים את מקדם ההתנגדות התרמית.
- ג) פרט וטיב הסגירה (איטום) - משפיע על הפסדים כתוצאה מחזירית רוח לבנין וממספר רב יותר של החלפות אויר.
- ד) אוריינטציה של הפתח - משפיעה על כמות הקרינה החודרת דרך החלון, התנגדות שיכבת אויר החוץ הצמוד לחלון, חדירת אויר כתוצאה מסדקים, איורור טבעי בבנין ותאורת יום.
- ה) הצללה - מונעת קרינה קצרת - גל החודרת דרך הפתח. כמו כן משפיעה על כמות האיורור והתאורה, בעיקר אם משתמשים בתריס.
- ו) סוג הזכוכית - משפיע על אחוז הקרינה הנבלעת, המוחזרת וחודרת לתוך החדר.

3. מחיצות פנים -

- א) חומר ועובי - קובע את קיבול החום של הבנין. ככל שקיבול החום גדול יותר, מגיב הבנין ביתר איטיות לשינויי האקלים בחוץ.
- ב) צבע - משפיע על כמות החזרת הקרינה וכתוצאה על התאורה והבהיקות.

4. תכנון פנים -

- א) אוריינטציה החדרים - פעילויות שונות בבנין מתבצעות בשעות שונות של היום ולפעמים דורשות תנאי אקלים שונים (טמפ', רוח וכד'). יש להתאים את תכנון הפנים בהתאם לזמני הפעילויות והאיזורים החמים והקרים יותר, הנוצרים בבנין.
- ב) מיקום מכשירים פולטי חום בבנין - יש להתייחס לתוספת קבועה של אנרגיה כתוצאה מפליטת חום של מכשירים כגון: מקרר, מכונת כביסה, גופי תאורה, וכן ריכוז אנשים. מכשירים פולטי חום יש לאווררם בקיץ וניתן לנצל את חומם בחורף.
- ג) מיקום מכשירים פולטי אדים בבנין - כמות האדים משפיעה על הלחות באויר ועל הרגשת הנוחות. בקיץ חשוב להפטר מהאדים במהירות מקסימלית.

5. תכנון המערכות המכניות -

- א) קביעת סוג המערכת - תלויה בסוג הבנין (כבד או קל) פונקציית הבנין ושעות השימוש בו, והאקלים במקום, לדוגמא: האם ניתן להשיג תנאים נוחים בקיץ ע"י איזורור בלבד?
- ב) גודל היחידה המכנית יחידה אופטימלית מבחינת עלות ההשקעה ועלות התפעול.
- ג) מדיניות הפעלת היחידה - הפעלה רצופה או בהפסקות, מאיזה שעה ועד איזה שעה.

כלים לתכנון אדריכלי מודע לאנרגיה ואקלים

א. מודלים לסימולציה שעתית

כלי התכנון העומדים לרשות האדריכלים כדי לבצע תכנון אנרגטי נכון של מבנים כוללים מודלים לסימולציה שעתית מדויקת. מודלים אלו מיועדים להעריך את רמת הביצועים התרמיים של פתרון ספציפי כל שהוא. במסגרת מאמר זה אציג בקצרה את מודל הסימולציה ENERGY לחיזוי התנהגות מבנים מהבחינה התרמית שפותח ע"י שביב ו-שביב. פרטים על מודל זה ראה בפרסומים (3-5).

מודל הסימולציה ENERGY מאפשר:

- חיזוי הטמפי' בתוך המבנה בהתאם לנתונים האקלימיים של המקום ובהתאם לאספקטים התכנוניים השונים של המבנה הנקבעים ע"י התכנית, מיקום הבנין והמפרט הטכני כשם שפורטו בסעיף הקודם.
- חישוב כמות האנרגיה שיש להשקיע בבנין במשך השנה על מנת לשמור על טמפרטורת פנים מוכתבת מראש.
- הכוונת המתכנן לאספקטים התכנוניים הדורשים שיפור בתוכנית המוצעת.

נוחות האקלים בבנין תלויה בגורמים הבאים:

- א) טמפי' האויר בחדר.
- ב) טמפי' הקרינה הממוצעת בנקודות שונות של החדר.
- ג) טמפי' הפנים של הקירות - חשובה לקביעת טמפי' הקרינה הממוצעת ולקביעה אם יוצר עיבוי על פני הקירות.
- ד) מהירות הרוח בחדר.
- ה) הלחות היחסית.

לפי אינדקס הנוחות התרמי שפותח ע"י גבעוני (6) או אולגה (7), ניתן לקבוע, האם בתנאים האקלימיים שנוצרו בחדר, ירגיש האדם בנות. במידה ולא ירגיש בנות, יש לשנות את התכנון של הבנין, או להוסיף אמצעים מכניים הגורמים לשינויי הטמפי' בחדר, לשינויי מהירות הרוח, או לשינויי הלחות היחסית. גבולות הטמפי' הרצויה בחדר יקבעו לפי התנאים הנוספים: לחות יחסית, מהירות רוח, וטמפי' הקרינה הממוצעת.

חישוב מעבר החום דרך מעטפת הבנין, נעשה ע"י פתרון סימולטני של משוואת זרימת החום דרך חלקי המעטפת השונים של הבנין. פרטים על ניסוח המודל ניתן למצוא בדו"ח המחקר (3).

1. קביעת שיטת החישוב - מודל דינמי לעומת מודל סטטי

בקביעת שיטת החישוב אתרכו בשוני שבגישות של חישוב דינמי לעומת חישוב סטטי ולא לשינויים בשיטות הסטטיות או הדינמיות השונות. בניגוד לחישובים ההנדסיים הסטטיים המבוססים על מצב עמיד (steady state) והמניחים שמעבר החום מהחדר לסביבה החיצונית מתרחש בפרק זמן השווה אפס, מתייחס מודל הסימולציה השעתית לתופעה הדינמית שבמעבר החום, ולעובדה שקיבול החום של המעטפת ושל קירות הפנים מהווה מאגר חום (מסה תרמית). עקב זאת התופעות מתרחשות במציאות בפרק זמן מסויים, שלפעמים הוא ארוך מהזמן שלוקח למוג האויר להתחלף בחוץ. כך למשל, לא ניתן להסביר ע"י החישובים הסטטיים, מדוע ביום חמסין בבנין הבנוי קירות

אבן עבים וחלונותיו סגורים וקטנים, תהיה הטמפי נוחה גם בלי מיזוג אוויר. לעומת זאת, בבנין הבנוי חומרים קלים בעלי התנגדות טובה יותר למעבר חום מאשר בנין האבן, יורגש החמסין אחרי מספר שעות. יש כמו כן, חשיבות לחישוב הדינמי עבור בניינים שאין משתמשים בהם כל היום כמו בנייני משרדים. החישוב הסטטי הממוצע, על כל שעות היום, אינו נכון במקרה זה. ככל ששינויי מזג האוויר בחוץ והאיחור בזרימת החום גדולה יותר, יהיו החישובים הסטטיים הממוצעים רחוקים יותר מהערכה נכונה של הפסדי אנרגיה.

בבניי מגורים ניתן בקיץ לעכב את מעבר החום עד שעות הערב הקרירות, ואז ע"י פתיחת חלונות ויצירת רוח פריצים להפטר מהחום שנאגר במעטפת הבנין. בחורף לעומת זאת, ניתן לאגור חום (החודר לבנין בצורת קרינה) במעטפת הבנין, ובשעות הקרירות יפלט חלק מהחום שנאגר במעטפת לתוך החדר, ובכך לחסך באנרגיה לצרכי חימום. תופעות אלו ניתן לחשב רק באמצעות מודל דינמי.

2. התייחסות לנתונים של תנאי האקלים.

בעיה נוספת קיימת והיא: כיצד להתייחס בחישובים לנתונים של תנאי האקלים. האם לקחת נתונים ממוצעים או נתונים משתנים לפי כל שעה ועונה? האם לקחת נתונים ממוצעים לימים הקשים ביותר בשנה, או לימים אופייניים? במרבית המקרים הקביעה של ההתייחסות לנתונים תהיה בהתאם לשיטת החישוב. חישוב דינמי יכול להעשות רק כאשר ידועים הנתונים האקלימיים בעונות השונות ובכל שעה של שעות היום. בחישובים שידווח עליהם בהמשך, הוכנסו נתונים אקלימיים מדוייקים לפי מדידות, שנערכו בארץ במספר שנים (8,9). תנאי האקלים הם: טמפי, קרינה (ארוכה וקצרה) לחות ומהירות רוח. הנתונים עצמם נקבעו עבור כל שעה בכל חודש של השנה. נבחרו נתונים ממוצעים לכל חודש והממוצע נקבע לפי מספר שנים כדי למנוע תנאים אקלימיים מקריים. הנתונים האקלימיים הרלבנטיים נשמרים בקובץ ואין צורך להזינם מחדש לפני כל בדיקה.

3. יצירה ושיפור אלטרנטיבות תכנון להשגת תנאי אקלים פנים נוחים.

בעיית חיזוי האקלים בבנין מורכבת ביותר, מהסיבות הבאות:

(א) מספר פרמטרי התכנון השפיעים על תנאי האקלים הוא גדול.

(ב) שיפור בתנאי האקלים והחיסכון באנרגיה המושג ע"י כל אחד מהפרמטרים בנפרד אינו ניתן לחיבור פשוט, כאשר מופעלים מספר פרמטרים יחד. יתר על כן - בתנאים מסויימים יכול להיות לפרמטר מסויי השפעה חיובית ובמקרים קיצוניים יכולה ההשפעה החיובית להפוך לשלילית. לדוגמה: אם ישנם בבנין חלונות גדולים סגורים ולא מוצללים, יכולה הקרינה הישירה לחמם את אוויר החדר לטמפי הגבוהה מטמפי החיצונית (תנאים של חממה). במקרה זה זרימת החום חיובית להתבצע מהאוויר שבבנין החוצה. בנין שמבודד טוב יותר, ימנע איבוד חום זה. במקרה זה לבידוד טוב של הקירות והגג תהיה השפעה שלילית על תנאי האקלים בבנין.

מודל מודל הסימולציה ENERGY מאפשר בדיקה של ההשפעה הכוללת של פרמטרי התכנון על תנאי האקלים בבנין ועל צריכת האנרגיה. תוצאות כל הבדיקה מאפשרת הצבעה על הנקודה החלשה בתכנון הנוכחי ועל הכיוון שיש ללכת בחיפוש אחר שיפור האלטרנטיבה, כך שניתן יהיה להגיע לתכנון בנין, בו האקלים הפנימי נוח ועם זאת הבנין צורך אנרגיה מועטה ככל האפשר.

4. נוחות השימוש במודל לבדיקת האלטרנטיבות.

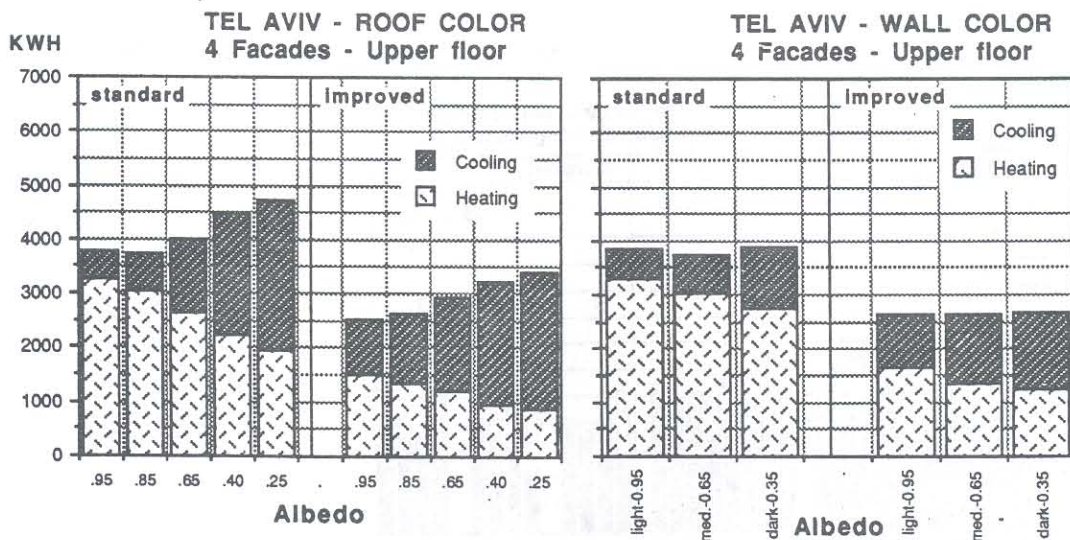
למרות שהחישובים שיש לבצע הם רבים, קיימת נוחות בבדיקת אלטרנטיבות באמצעות מודל סימולציה, כיון שהחישובים נעשים ע"י מחשב ואין צורך בכל פעם לחשב בצורה ידנית כל אלטרנטיבה (עם כל העבודה השחורה הכרוכה בחישובים הרבים). כמו כן נתוני האקלים שמורים בזיכרון. יש על כן צורך בכל בדיקה רק להכניס את הנתונים המתייחסים לאלטרנטיבה הנבדקת. המודל פותח במטרה לשמש כלי עזר לארכיטקט בשלבי התכנון השונים, ועל כן הושם הדגש על היכולת לבדוק את כל האספקטים התיכנוניים, החל בתוכנית הכללית, העמדת הבנין בשטח ועד פרטי הבנין.

ב. חוקי אצבע להנחיות והמלצות כלליות

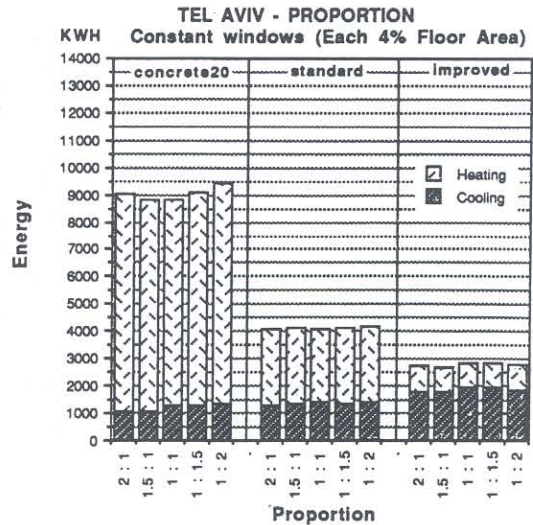
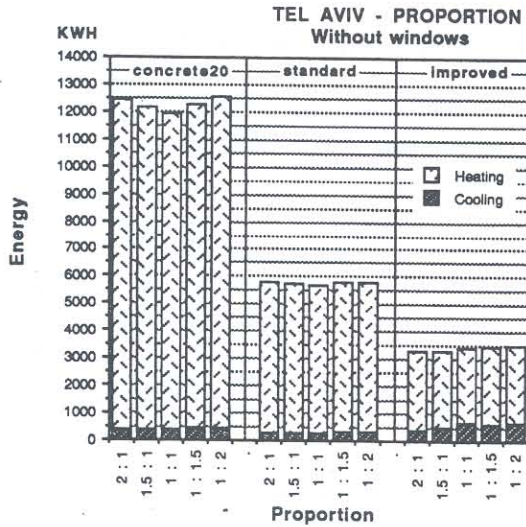
מכיון ובעיית חיזוי האקלים בבנין מורכבת ביותר ומושפעת ממספר רב של פרמטרי תכנון, יש צורך בנסיון ומומחיות בשטח על מנת להצביע כבר בשלבי התכנון הראשונים על עקרונות נכונים להשגת תכנון המודע לאקלים ואנרגיה. היות ולא כל הארכיטקטים הם בעלי נסיון ומומחיות זו, נולד הצורך בכלי תכנון אחרים, פשוטים לחלוטין, בצורה של חוקי אצבע. חוקים אלו, המבוססים על הנסיון שהצטבר, בעיקר בעזרת הרצת מספר עצום של סימולציות אקלימיות-אנרגטיות (10), מספקים הנחיות והמלצות כלליות ומאפשרים קבלת החלטות תכנון בצורה טובה כבר בשלבים הראשונים. גם עבור המתכנן המנוסה, שבאפשרותו להעריך ביצועים אנרגטיים בעזרת מודל סימולציה שעתיד, מהווים חוקים אלו כלי תכנון חשוב ביותר, העוזר בקביעת כיוון הפתרון הרצוי.

על מנת להמליץ על חוקי אצבע מנחים בוצע מחקר עבור משרד הבינוי והשיכון הבדק את רגישות ההתנהגות התרמית של הדירות הסטנדרטיות שהם בונים לשינויים בפרמטרי התכנון השונים (11,12). הדירות שנבדקו היו בשטח של 100 מ"ר וכללו דירות בבנין טורי ובבנין מגדל. במחקר זה נבדקו דירות הנמצאות במצב שונה בתכנית וכוללות לכן מספר שונה של קירות חוץ כגון: דירות פנימיות שיש להן שני קירות חוץ, דירות גמלוניות שיש להן שלושה קירות חוץ ודירות בעלות ארבעה קירות חוץ, כלומר יכולות ליצג בית פרטי. כמו כן נבדקו דירות במצבים שונים בתוך חתך הבנין כגון: דירות גג, דירות אמצעיות, או דירות בקומה ראשונה. עבור דירות אלו נבדקה רמת השיפור המומלץ ועד כמה כדאי להוסיף להן זיגוג דרומי, כדי לקלוט אנרגיה סולרית פסיבית. גם עבור דירות משופרות אלו נקבעה רמת רגישותן התרמית לשינויים בפרמטרי התכנון השונים.

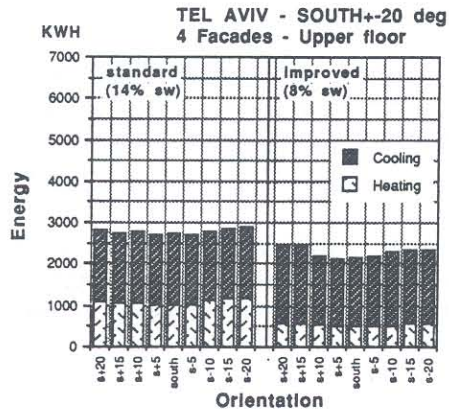
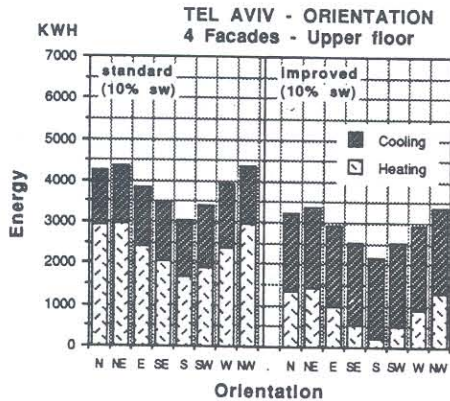
תוצאות מחקר זה הצביעו על כך שלחלק מהפרמטרים התכנוניים, כמו למשל צבע קירות הבנין כאשר הם מבודדים כמומלץ, אין כמעט השפעה על צריכת האנרגיה של הבנין ועל התנהגותו התרמית. צבע הגג נמצא חשוב יותר (ראה תמונה 7). גם לפרופורציות הבנין השפעה קטנה על התנהגותו התרמית כל עוד שטח החלון הדרומי המומלץ ניתן ליישום ובתנאי שהבנין מבודד על פי ההמלצות (ראה תמונה 8). לעומת זאת סטייה של החלונות הגדולים מדרום לכוונים אחרים יש לה השפעה גדולה מאד על התנהגותו התרמית של הבנין (ראה תמונה 9). תוספת של שטח חלון לכוון דרום נמצאה שיכולה להקטין את צריכת האנרגיה של הבנין בצורה משמעותית. בשטח מספיק גדול יש אפשרות להגיע לצריכת אנרגיה אפסית לחימום. זהו למעשה הבנין הסולרי הפסיבי (תמונה 10).



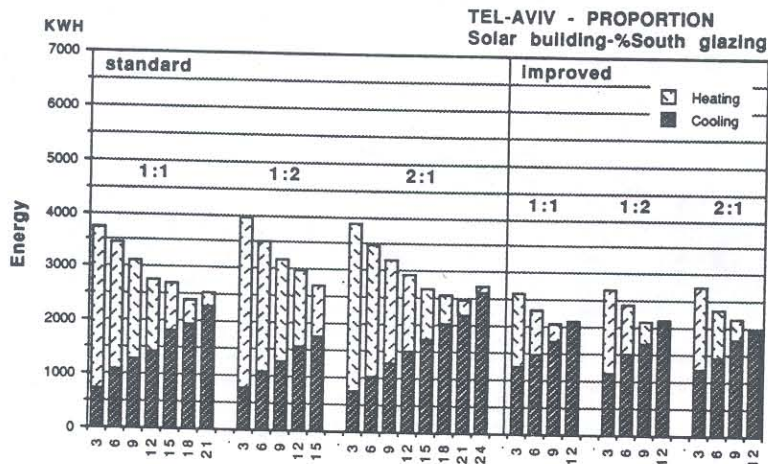
תמונה 7: השפעת צבע הקירות והגג על צריכת האנרגיה של הבנין.



תמונה 8: השפעת פרופורציות הבנין על צריכת האנרגיה שלו.



תמונה 9: השפעת אוריינטציה הבנין על צריכת האנרגיה שלו.



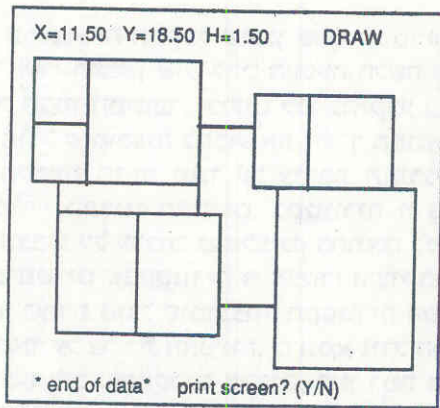
תמונה 10: הגדלת שטח החלון הדרומי עד קבלת צריכת אנרגיה אפסית לחימום.

מהאנליזה הפרמטרית שבוצעה התקבל שישנן שלש קטגוריות שונות של פרמטרי תכנון. בקטגוריה הראשונה נכללים פרמטרי התכנון שיש להם השפעה חלשה על צריכת האנרגיה של הבנין. פרמטרים אלו, כגון צבע קירות הבנין המשופר, יכולים לכן להיקבע באופן שרירותי. בשלב מתקדם יותר של התכנון ניתן בעזרת מודל סימולציה לקבוע את הערך המומלץ ביותר. הסוג השני כולל את פרמטרי התכנון שיש להם השפעה חזקה מאד על צריכת האנרגיה אבל רגישים רק במעט להחלטות שהתבצעו לגבי פרמטרי התכנון האחרים. בקטגוריה זו נכלל לדוגמא רמת בידוד הבנין. עבור פרמטרים אלו יש להצביע על ערכים מומלצים, בהתאם למקום הגיאוגרפי ולמיקום הדירה בבנין המשותף. גם עבור פרמטרים שבקטגוריה זו אפשרי ורצוי בשלבי תכנון מתקדמים יותר לקבוע את ערכם המומלץ ביותר בעזרת מודל סימולציה. הקטגוריה השלישית היא זו של פרמטרי התכנון שיש להם השפעה חזקה מאד על צריכת האנרגיה, לדוגמא גודל החלון הדרומי המומלץ, ושהם גם רגישים מאד להחלטות שבוצעו לגבי פרמטרים אחרים, כגון רמת הבידוד, שטח החלונות שאינם דרומיים ואוריינטציה הבנין. עבור פרמטרים מקטגוריה זו קשה להמליץ על גדלים אבסולוטיים, כיון והם תלויים בערכים שנקבעו עבור פרמטרי התכנון האחרים. ההמלצה שלנו היא לבצע בדיקה מדויקת יותר לקביעת גודל הפרמטרים מקטגוריה זו כבר בשלבי התכנון הראשונים, בהתאם למקרה הספציפי, ולא להסתפק בחוקי אצבע פשוטים.

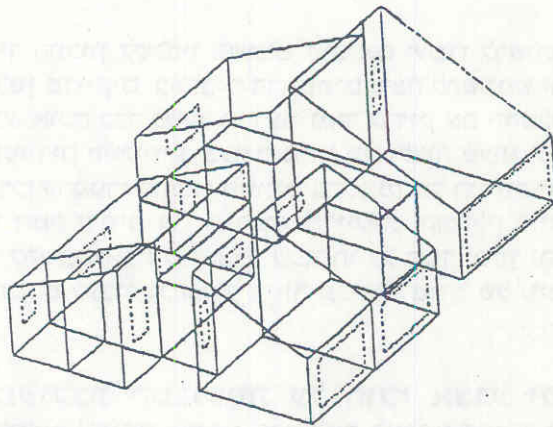
למעשה מתקבל שבתהליך התכנון לשלבי השונים טוב אם יעמדו לרשותנו מצד אחד כלי תכנון פשוטים ומצד שני כלי תכנון מדויקים. בשלבים הראשונים נרצה להשתמש יותר בכלי תכנון פשוטים המבוססים על חוקי אצבע. אולם כבר בשלב זה רצוי מאד לבדוק את ההמלצות של פרמטרי התכנון הרגישים, המשתיכים לקטגוריה השלישית, בעזרת מודל סימולציה שעתיד לגבי הקטגוריות האחרות ניתן להסתפק בקביעת ערכי פרמטרי התכנון השונים בהסתמך על הנחיות והמלצות כלליות, שיוכלו להשתלב בשלבי התכנון המתקדמים עם הערכות מדויקות. התהליך הוא למעשה תהליך רציף שלאורך כל הדרך אפשר להשתמש בחוקי אצבע שפותחו על סמך נסיון והמתאים למקרה הכללי. ככל שתהליך התכנון מתקדם לעבור ולהפעיל ביתר תכיפות מודל של סימולציה מדויק להערכה ספציפית של הפרויקט.

ג. מערכת מחשב משולבת המבוססת על חוקי אצבע וסימולציה שעתיד

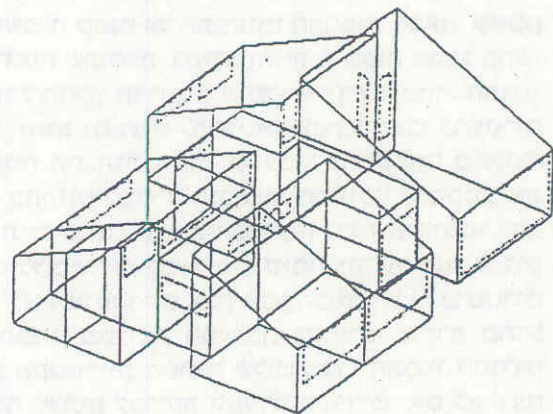
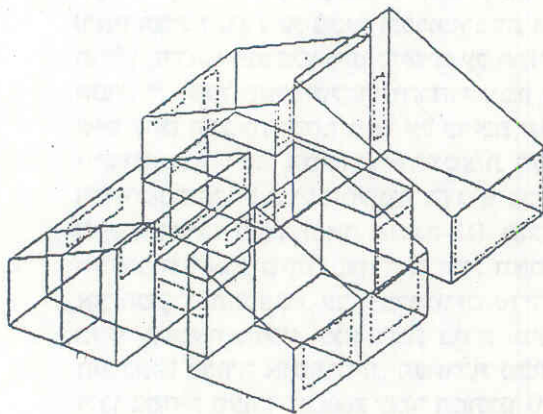
בהתאם לרעיון המוצג בסעיף הקודם, פתחנו בפקולטה לארכיטקטורה מערכת מחשב משולבת המבוססת על חוקי אצבע המתאימים למקרה הכללי ועל סימולציה מדויקת לבדיקת המקרה הספציפי (13). מערכת זו, מבוססת על הידע שנרכש עם הנסיון. ידע זה נשמר בצורה של חוקים המנחים את הארכיטקט בקבלת החלטות תכנון נכונות מהבחינה האנרגטית. המערכת מאפשרת לארכיטקט להכניס סקיצה של תכנית גושי הבנין באופן שרירותי ולהגדיר את הגבהים בכל נקודה (ראה תמונה 11). זאת מכיון ולפרופורציות הבנין השפעה קטנה על התנהגותו התרמית כל עוד שטח החלון הדרומי המומלץ ניתן ליישום על החזית הדרומית שתוכננה. במידה וחזית זו קטנה מגודל החלון המומלץ, יקבל הארכיטקט אזהרה. לעומת זאת גודל החלון הדרומי המומלץ שייך לפרמטרי התכנון שיש להם השפעה חזקה מאד על צריכת האנרגיה, והוא גם רגיש להחלטות שבוצעו לגבי פרמטרים אחרים, כגון רמת הבידוד, אוריינטציה הבנין ושטח החלונות האחרים. עבור פרמטר זה ממליצה המערכת מיד על גודל החלונות הדרוש בכל כיוון בהתאם למקרה הספציפי המתוכנן וממקמת את החלון במרכז הקיר (ראה תמונה 12). קובץ הנתונים עבור ריצת הסימולציה נבנה אוטומטי ללא התערבות הארכיטקט. בצורה זו יכול הארכיטקט ללא טרחה לבצע מיד סימולציה על מנת לבדוק את המקרה הספציפי. עבור פרמטרים שרירותיים לא גיאומטריים, כגון צבע הבנין, ועבור פרמטרים בעלי השפעה חזקה, כגון רמת בידוד מעטפת הבנין, ממליצה המערכת על ערכי ברירת מחדל הנקבעים בצורה אוטומטית. המערכת מכירה את הקטגוריות השונות של פרמטרי התכנון שהגדרנו ולכן במידת הצורך מבצעת עבור המתכנן סימולציה שעתיד לבדיקת המקרה הספציפי. אם לא ירצה הארכיטקט לקבל את הערכים המומלצים על ידי המערכת, יוכל לקבוע את הערכים בעצמו (תמונה 13). במדה והפרמטר הוא בעל השפעה חזקה, תתבצע ע"י המערכת סימולציה לשם השוואת ביצועי הבנין המומלץ ע"י המערכת עם ביצועי הבנין שתוכנן שרירותית ע"י הארכיטקט (ראה תמונה 14). על סמך הערכה זו יכול הארכיטקט בצורה מבוקרת לקבל החלטות תכנון המודעות לאנרגיה.



תמונה 11: הכנסת גיאומטרית הבנין עיני סקיצת תכנית גושי הבנין והגדרת הגבהים בכל נקודה.



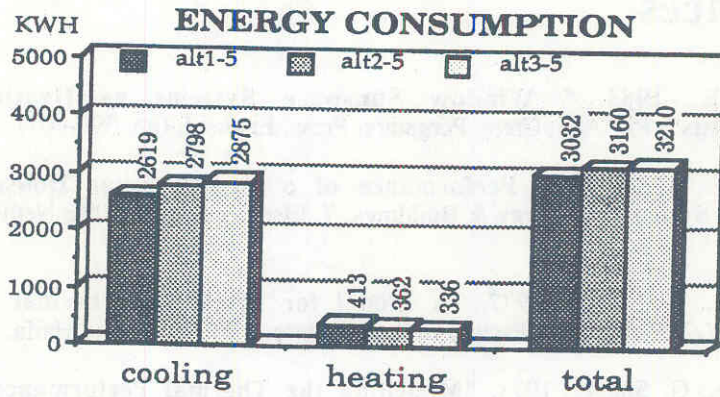
תמונה 12: מבט אקסונומטרי על הבנין המתוכנן. המערכת ממליצה על גודל החלונות הדרוש בכל כיוון בהתאם למקרה הספציפי המתוכנן וממקמת את החלונות במרכז כל קיר (חלופת תכנון 1).



א.

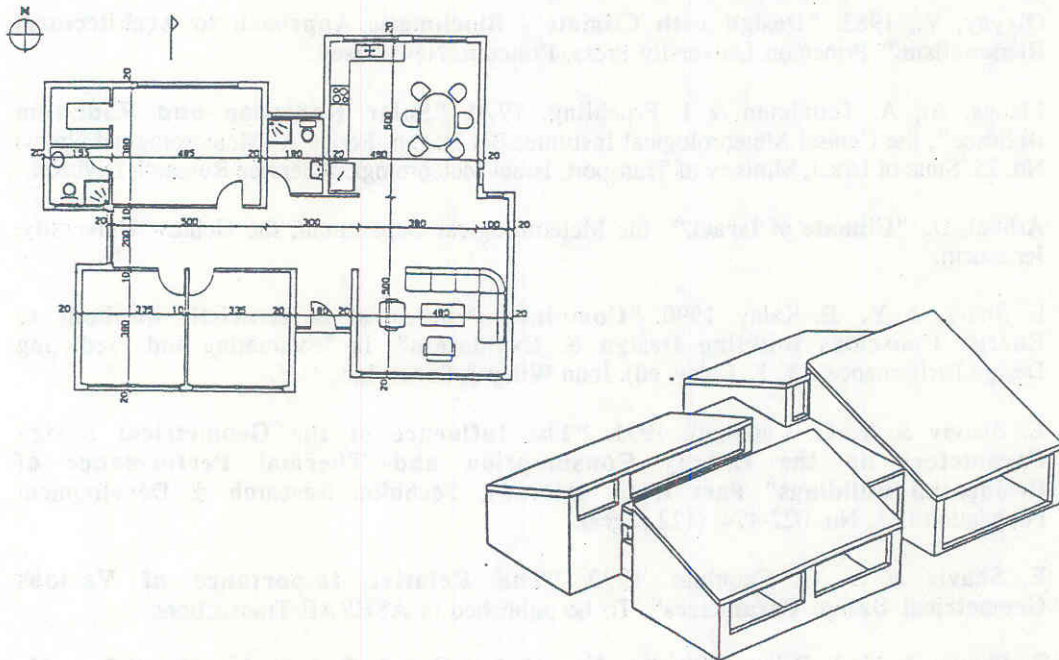
ב.

תמונה 13: א. מבט אקסונומטרי על חלופת תכנון 2; חלון נוסף מוצע על הקיר המערבי. ב. מבט אקסונומטרי על חלופת תכנון 3; חלון נוסף מוצע על הקיר המזרחי.



תמונה 14: השוואת ביצועי שלוש חלופות התכנון.

תוך תהליך התכנון נבנה אוטומטי גם קובץ הנתונים הדרוש להצגת הבנין בשלשה ובשני מימדים ע"י תכנת התיב"ם ARC+ (14) שפותחה בארץ והמאפשרת להכין את תכניות העבודה של הפרויקט (תמונה 15). בצורה זו, תוך התיעצות עם המערכת שפתחנו, ושבתוכה הוכנסו הנתונים של הידע שהצטבר בנושא של תכנון מודע לאקלים ואנרגיה, מתבצע תהליך התכנון לשלביו השונים. בצורה זו ניתן בצורה קלה לתכנן בניינים הנכונים מהבחינה האנרגטית.



תמונה 15: הצגת הבנין בשלשה ובשני מימדים ע"י תכנת התיב"ם ARC+. קובץ נתוני הבנין נבנה אוטומטית ע"י המערכת.

סיכום ומסקנות

בעידן שלנו, בו קיים מחסור באנרגיה, יש מקום לשינוי ערכים במחשבה הארכיטקטונית. שינוי ערכים זה מתבטא בהבאת תצורות האנרגיה והמקור-האקלים המושג בבנין, לידי אחד הערכים העליונים בקביעת איכות הפתרון מבחינה ארכיטקטונית. על כן חייבת להיות אינטגרציה של הצרכים הפונקציונליים של הבנין עם הדרישות האקלימיות של המקום ועם העיצוב החללי של המבנה כבר משלבי התכנון הראשוניים. בצורה זו תפתח גם ארכיטקטורה מסורתית-מקומית השואבת את תכונותיה וצורתיה הבסיסיות מתנאי המקום.

References

1. Shaviv, E., 1983. "Window Sunspace Systems as Heating & Cooling Components". PLEA83, Crete, Pergamon Press, England, (pp. 399-407).
2. Shaviv, E., 1984. "The Performance of a Passive Solar House with Window Sunspace Systems". Energy & Buildings, 7, Elsevier Sequoia, The Netherlands, (pp. 315-314).
3. Shaviv, E., G. Shaviv, 1977. "A Model for Predicting Thermal Performance of Buildings". WP ASDM-8, Faculty of Architecture & TP, Technion. Haifa. (41 pages).
4. Shaviv, E., G. Shaviv, 1978. "Modelling the Thermal Performance of Buildings". Building & Environment, Vol. 13, Pergamon Press Ltd., England, (pp. 95-108).
5. Shaviv, E., G. Shaviv, 1978. "Designing of Buildings for Minimal Energy Consumption". CAD Journal, July, Vol. 10, No. 4, IPC Business Press, England, (pp. 239-247).
6. Givoni, B., 1976. "Man, Climate and Architecture." Applied Science Pub., Second edition.
7. Olgyay, V., 1963. "Design with Climate - Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism." Princeton University Press. Princeton, New Jersey.
8. Manes, A., A. Teitelman & I. Fruehling, 1970. "Solar Radiation and Radiation Balance", the Central Meteorological Institute, Bet Dagan, Series A (Meteorological Notes) No. 25. State of Israel, Ministry of Transport, Israel Meteorological Service Research Division.
9. Ashbel, D., "Climate of Israel." the Meteorological Department, the Hebrew University, Jerusalem.
10. E. Shaviv & Y. E. Kalay, 1990. "Combined Procedural & Heuristic Methods to Energy Conscious Building Design & Evaluation", in "Evaluating and Predicting Design Performance" (Y. E. Kalay, ed). John Wiley & Sones, Inc., N.Y.
11. E. Shaviv & Y. G. Capeluto, 1991. "The Influence of the Geometrical Design Parameters on the Energy Consumption and Thermal Performance of Residential Buildings" Part 1. (in Hebrew). Technion Research & Development Foundation Ltd., No. 022-474, (122 pages).
12. E. Shaviv & Y. G. Capeluto, 1992. "The Relative Importance of Various Geometrical Design Parameters". To be published in ASHRAE Transactions.
13. E. Shaviv & U. J. Peleg 1990. "A Knowledge Based System for the Schematic Design of Passive Solar Buildings". ASHRAE Transactions, V. ST-96-2. Atlanta.
14. ACA ltd. 1989. "ARC+ 3-D Architectural software - User's guide", Israel.

ישומים של אנרגיה חלופית ע"י חברת אורמת

ד"ר אורי פישר

מנהל מחקר ופיתוח בחברת אורמת בע"מ

אורמת עוסקת בנושא אנרגיות חלופיות, מתוך רצון להגיע לאי תלות במקורות דלק חיצוניים. אורמת החלה את עבודתה על הבריכה הסולרית, והמטרה הראשונה היתה ליצור חשמל. דובר על האפשרות שהדלק הפוסילי יגיע לעלות של 60 דולר לחבית, ובמחירים כאדלה בודאי כדאי לנצל מקורות אנרגיה אחרים. הטכנולוגיה של הברכה נלמדה ופותחה וחברת אורמת יודעת לבנות ברכה סולרית, לשלוט בגרדיאנט הטמפרטורה שלה ובגרדיאנט המליחות, להוציא את האנרגיה ולהלחם בתנאי מזג האוויר שמעל פני הברכה.

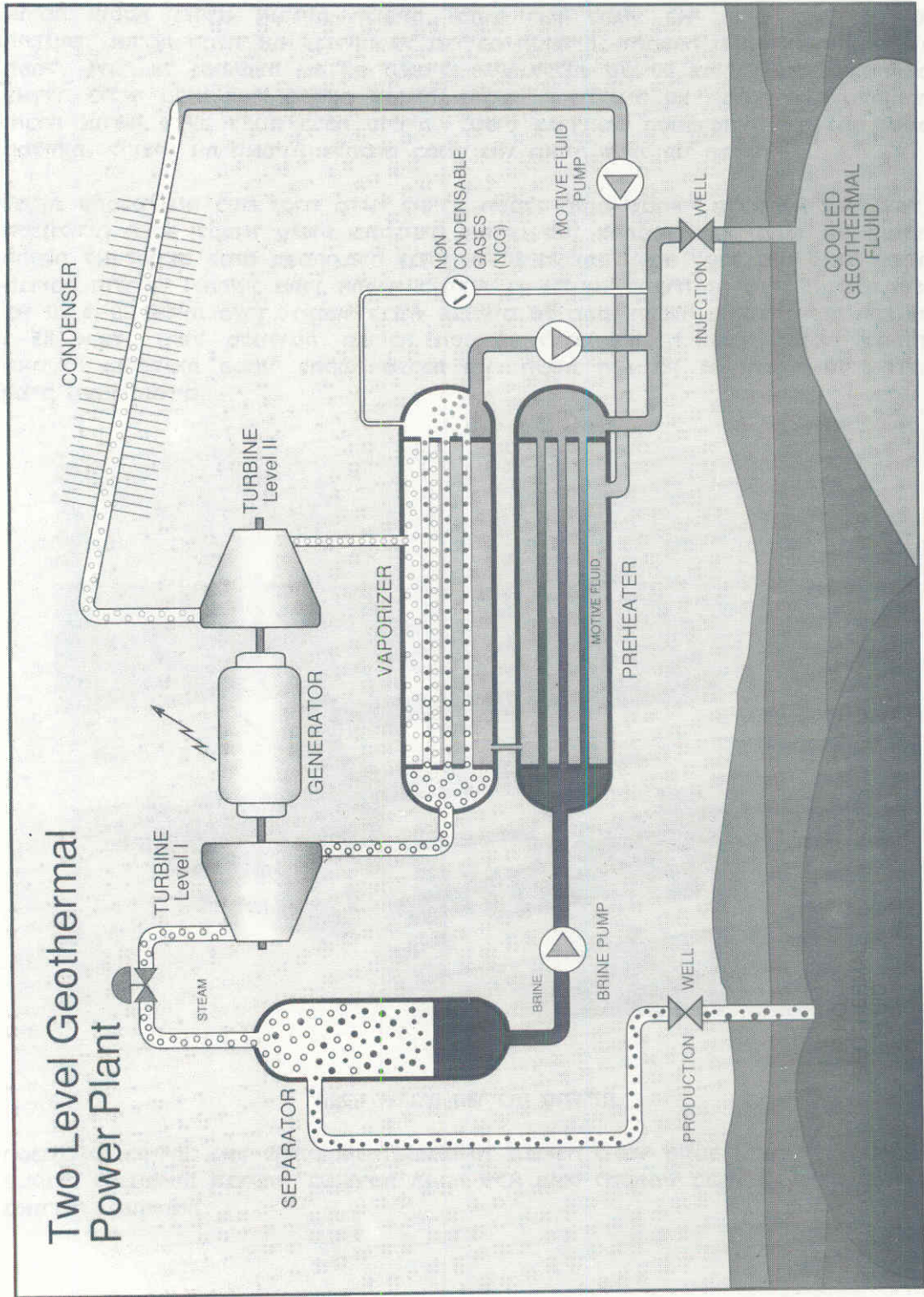
למרות שהטכנולוגיה כיום יקרה מדאי ליצירת חשמל, משום שמחירי הדלק לא עלו כצפוי, הטכנולוגיה יכולה למצוא שימוש בתהליכים אחרים כגון להתפלת מים. מתקן של הנדסת התפלה לא זקוקים למים בטמפרטורה גבוהה מ-80 מעלות. אפשר לקבל מים כאלו בקלות מבריכה סולרית, ולהתקין מתקן התפלה ביעילות די גבוהה. במקרה זה ניצול הבריכה הוא בין 80 ל-30 מעלות בערך, ואפשר לבנות 14 קוים של מתקן התפלה ולהגיע לייצור חום של כ-85 אחוז. ניצול טכנולוגית הבריכה הסולרית לצרכי התפלה יעילה. הוגשו למשרד האנרגיה והחקלאות תמחיר להקמת מערכת כזו. העלות היא בין 80 סנט ל-1.10 דולר למ"ק מים מותפלים.

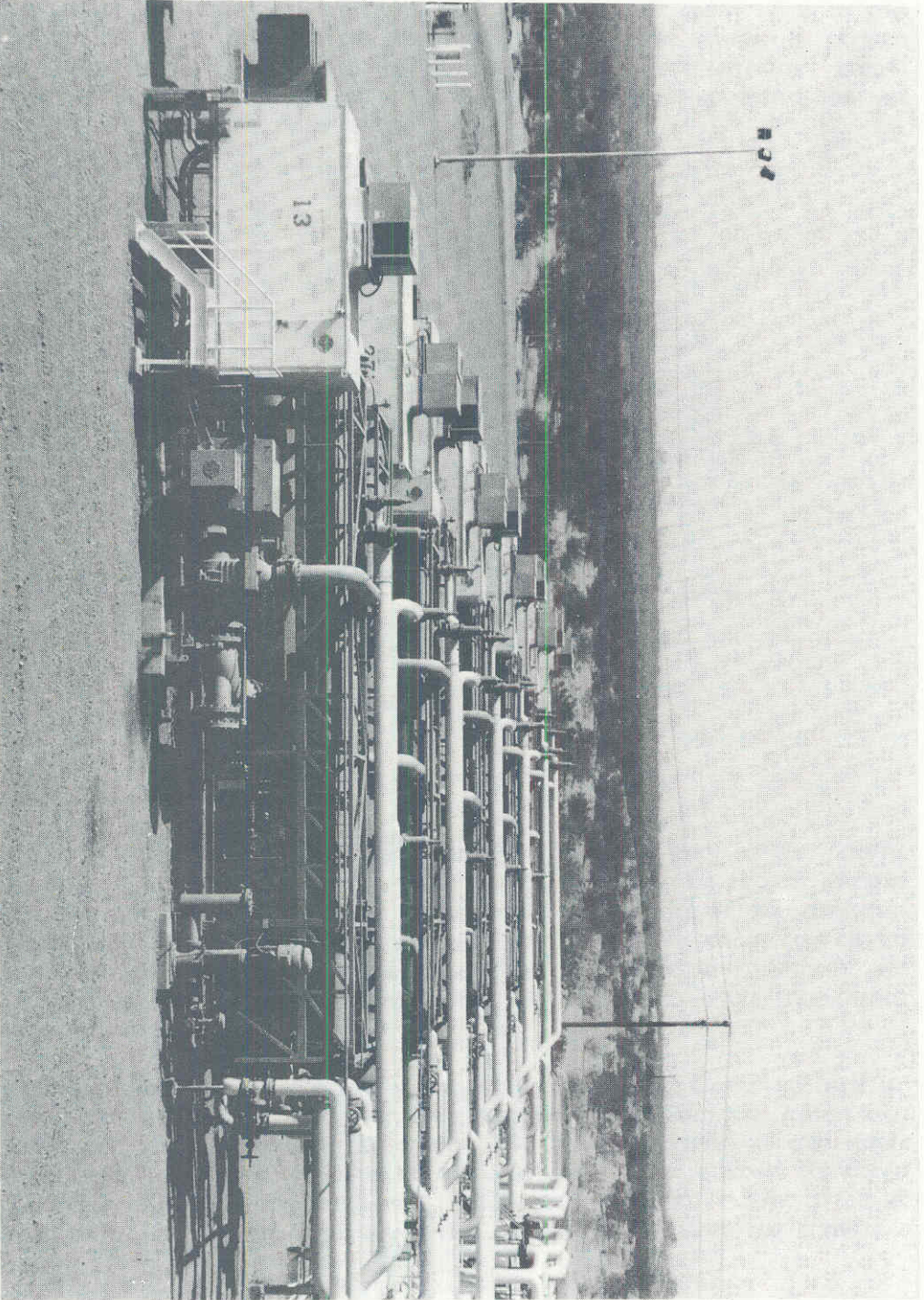


הפקת אנרגיה מבריכות סולריות

הטכנולוגיה בעזרתה ניסו להפיק את האנרגיה של הבריכה לייצור חשמל (ראה ציור), פותחה במקביל לטכנולוגית הבריכה. כשאורמת ראתה שלא תוכל להשתמש בבריכות, חזרנו לשימוש באנרגיה גיאותרמית.

Two Level Geothermal Power Plant



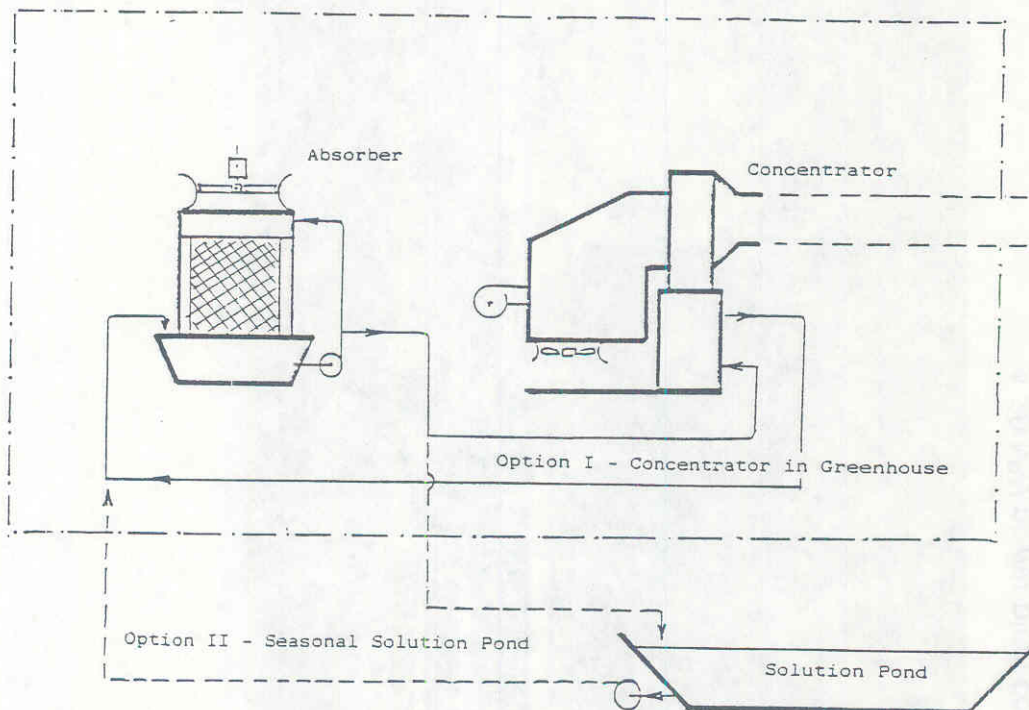


- 20 MW power plant comprising 20 ORMAT Energy Converter (OEC) modular units arranged in two cascading levels.

אנרגיה גיאותרמית מנוצלת בעולם. היא מופיעה לפעמים כקיטור, לפעמים כמים חמים ולפעמים כשילוב שניהם. לאורמת היתה כבר טכנולוגית הבריקה ומבריקה לעבור למים חמים של בארות גיאותרמיות זה קל. מים חמים שניתן וכדאי לנצל בבארות הם בטמפרטורה של מ-140 עד 200 מעלות. כשהטמפרטורות המצויות יותר גבוהות, ישנם בדרך מתחרים גדולים כגון מיצובישי. אבל בטמפרטורות יותר נמוכות, הידע שלנו מספיק והצלחנו להקים מערכת יעילה ופעילה המופעלת בכמה מקומות בעולם. השדות הגיאותרמיים של אורמת הגדולים ביותר הם בדרום קליפורניה, נבדה, יוטה וגם בהוואי. יש גם תחנות קטנות בניו זילנד,

ארגנטינה, מקסיקו, איסלנד ועכשיו מוקמת אחת באיים האזוריים.

התחנה שאנו בונים בנויה בדרך כלל ממודולים של 1.3 מגוואט, והן בנויות על עקרון מים חמים. היתכנון שמצאנו בהקמת מודולים כאלה שמגיעים לנצילות האפשריות בלמעלה מ-95%. תחנה כזו עובדת 24 שעות ללא הפסקה בזמינות של 95%, ולכן זה רווחי. במקרה שלנו, בתחנה של 30 מגוואט יש סדר גודל של 20 טורבינות, תמיד ניתן לתחזק אחת או שתיים מהן ולהפעיל את האחרות באופן שוטף.



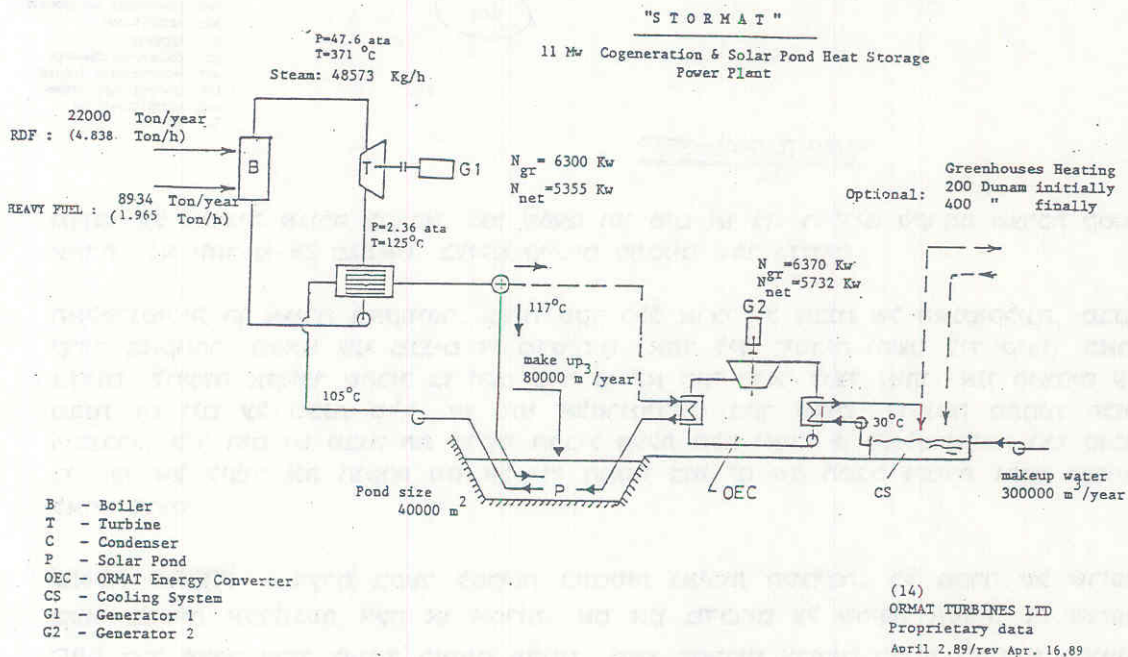
נושאים אחרים הקשורים ישירות או בעקיפין לאנרגיה חליפית הם מתקן לייבוש חממות. מתקן פשוט שמבוסס על היגרוסקופיות מלח. מעבירים דרכו את האויר של החממה ומיבשים אותו ב-5%. שילוב זה של מתקן עם חממה מגודרת היטב נותן חסכון של 60% מהאנרגיה שצריך לחממה. מי שמשמש במתקן שלנו בתכנון חממות יכול מראש לתכנן כמערכת עם תנור חימום בחצי ההספק. החסכון הוא לא רק בהשקעה אלא גם בשימוש באנרגיה. אם חוואי צורך היום 16 טון דלק לשנה בחממה של דונם, הוא יצרוך רק 6 טון. לגבי חימום ועלויות חשמל זה חסכון גדול.

נושא אחר בהיגרוסקופיה או בניצול תכונות של תמיסות היגרוסקופיות. עובדים על נושא של החלפת אנרגיה מתמיסות היגרוסקופיות - זה נושא שנמצא בפיתוח. כשמוהלים תמיסת מלח בתהליך הידרותרמי, מיצרים חום שניתן לנצל אותו. באותה טמפרטורה תמיסת מלח תספוג אליה מים, ומנצלים את מעבר החום פשוט על ידי קולט החום. אפשר להעמיד ליד הקולט טורבינה וזה יעבוד גם בהפרש טמפרטורות קטן. אם זה מאגר שבנוי בשלב אחד מדובר על הפרש טמפרטורות של כ-12 מעלות. ניתן לעשות זאת בשלבים, גם במאגרים וגם בהתפלה.

קיים בשטח זה נושא שנמצא כבר ביישום, והוא ריכוז של פליטות מלח. פה מנצלים את האנרגיה של האויר היבש בנגב כשמרססים תמלחת זרז מסה של אויר. היחס בין כמות האויר לכמות המים הוא גדול. אנו מאייזים כמות גדולה מאד של מים, מנצלים את האנרגיה של האויר. מערכת כזו כבר פועלת ברמת חובב, ואפשר לשלב את זה לניצול ייצור אנרגיה. כמובן שהיא משמשת כגנרטור, כשהדלק הוא למעשה התמיסה של המלחים.

אורמת גם קשורה בנושא של פיתוחים היגרוסקופים עם טורבינת גז, מחזור ברייטון, וחימום אויר בעזרת מערכת סולרית.

נושאים אחרים שקשורים לא ישירות באנרגיות חלופיות: בודקים עם חברת אמניר את הנושא של שריפת אשפה, לא שריפה ישירה. בשריפה ישירה יש הרבה בעיות סביבתיות. חברת אמניר ממכינה מתקן למיון אשפה ליד עפולה ומכינים שם דלק בעל ערך קלורי של כ-3000 ק"קל לק"ג. דלק זה הוא אחרי סינון של הרבה מהמזהמים, וצריך יהיה לטפל בו בסוף התהליך. אבל כיום כבר יודעים איך לטפל במערכת ומקווים שדי מהר אפשר יהיה להקים תחנת כוח. אם יסתפקו רק בדלק הזה ההספק יהיה 2-3 מגוואט, ואם אפשר יהיה להוסיף דלק קונבנציונלי, בהתחשב שבעתיד כמויות האשפה תגדלנה, אפשר לדבר על תחנה של 5 מגוואט. מערכת דומה אנו מציעים להקים על האשפה של ירושלים. שם רוצים לעשות שילוב של אגירת אנרגיה בבריכה הסולרית בבית הערבה, שהושקע בה כסף ולא נעשה בה שימוש. האשפה תשרף בטורבינת קיטור, המיבש של הטורבינה יקורר על ידי מי בריכה, כלומר תהיה אגירה של אנרגית חום בתוך הבריכה והחלק הזה של התחנה יעבוד ברוב הזמן. החלק הזה של התחנה יפיק 5 מגוואט והתחנה כולה תוכל להפיק 11 מגוואט. מדובר על אגירה בבריכה סולרית בים המלח. זה מקום ייחודי כי לא כדאי להקים במקום אחר במיוחד בריכה כזו.



אורמת עובדת על פרויקט נוסף, של אגירת אויר בלחץ, אגירת אנרגיה בתוך האדמה. טורבינת גז רגילה מחולקת לשניים, טורבינה וקומפרסור, ולמעשה שני שליש מהאנרגיה של הטורבינה הולך לקומפרסור. כאן מדובר על הפעלה של שתי הפונקציות, כאשר הקומפרסור יופעל רק בשעות שאין צורך בחשמל. הטורבינה, כאשר צריך, תקבל אויר דחוס מהמאגר התת קרקעי ותוכל לספק אנרגיה.

אורי פישר - עשינו הדגמה במפעלי ים המלח. התעוררה גם בעיה ברמת חובב, ובנינו מערכת שאפשר לקרוא לה "אמיתית" בפתרון בעית השפכים של מפעל מכתשים, והמערכת הזו עובדת ומאיידת כ-1000 טון ליום, כ-300,000 טון מים לשנה. היא מצמצמת באופן ניכר את שטח בריכות האיוד שהיו דרושות אילו לא השתמשו במערכת האיוד שלה. הנושא הזה ישנם בארץ ובחו"ל. למשל בעיות של נקז חקלאי, היא בעיה קשה בקליפורניה, ב-Central Valley ליד סן פרנציסקו. אחת האפשרויות היחידות שם היא פתרונות מסוג זה. כאן מדובר במערכות שעולות מאות מיליוני דולרים. מדובר על יישומים תעשייתיים בקנה מידה אמיתי, שמשלמות את עצמם די מהר למפעל.

אגב, בנושא של אנרגיה בממסר, ריכוז בעזרת ממסר, משלמים כחצי קילוואט שעה למ"ק של איוד, בזמן שבממסר מכני, בעזרת מדחס או חום משלמים בערך פי שלושים יותר, בין 15 ל-25 קילוואט שעה למ"ק איוד באנרגיה.

ישומים באנרגיה סולרית

יואל גילון

לוז תעשיות בע"מ

לוז מפתחת ומפעילה ומתכננת מערכות סולריות להפקת חשמל. באתר שבציוור יש שתי תחנות, אחת של 15 מגוואט והשניה של 30 מגוואט.

קבוצת פרויקטים הממוקמת ב-Kramer Junction בקליפורניה

Kramer Junction	מיקום
1986-1988	שנים
150 מגאוט (5 פרויקטים)	הספק מותקן
550 מיליון דולר	סה"כ מכירות
LS-2	טכנולוגיה
65 מיליון דולר	הכנסות שנתיות ממכירת חשמל
מחיר קבוע לאנרגיה	אופי חוזה האנרגיה

בתמונה יש חמש תחנות, כל אחת של 30 מגוואט סה"כ 150 מגוואט, בקליפורניה. העלות לתחנה היתה כ-110 מיליון דולר. הטכנולוגיה היא של הדור השני של קולטי שמש. שטח אוגרי השמש כ-200,000 מ"ר, והשטח קרקע שהם תופסים הוא 700,000 מ"ר. הטמפרטורות המגיעות ל-350 מעלות, המרה לחשמל בסדר גודל של 30 אחוז יעילות. החוזה שעל בסיסו אפשר היה להקים את התחנה, היה עם מחיר אנרגיה קבוע של 10 סנט לקוואט/שעה (שנת 1984).

קבוצת פרויקטים הממוקמת ב-Harper Lake בקליפורניה

Harper Lake	מיקום
1989-1993	שנים
460 מגאוט (5 פרויקטים)	הספק
1500 מיליון דולר	סה"כ מכירות (צפוי)
LS-3	טכנולוגיה
150 מיליון דולר	הכנסות שנתיות ממכירת חשמל
מחיר אנרגיה משתנה	אופי חוזה האנרגיה

הטכנולוגיה בתחנות אלה היא של הדור השלישי של קולטים. קולטים פרבוליים. השיפור הוא בצינור הקולט, ולכן מגיעים לטמפרטורה של 400 מעלות. אלו תחנות של 80 מגוואט שהוקמו ב-1989 עם שטח קליטה של 460 עד 500 אלף מ"ר, והתוצאה היא 50 מגוואט לקמ"ר. ההמרה לחשמל היא באמצעים קונבנציונליים, בסדר גודל של 38%. המיפתח של הקולט הוא 6 מ' אורכו כ-100 מ'. מדובר על כ-900 קולטים לתחנה. בקרוב לאתר הקודם מוקמת תחנה נוספת של 80 מגוואט. היום מדובר על תחנה לא רק סולרית, אלא יש כאן יכולת גם להפיק חשמל באמצעים קונבנציונליים, לפי יחסים של אחד לשלוש. 25% מהתפוקה לעומת 75% חשמל. המחיר שמיצג את עלות החשמל הוא כ-9.5 סנט לקוואט"ש ושאר ההכנסות מגיעות לעלות הקמת התחנה בשלושים שנה וזה לגבי כל התחנות עד 450 מגוואט.

המספר בשקף מיצג את סך המכירות. מספר זה מיצג את סך המכירות לתחנות של 450 מגוואט. כל אחת מחמש התחנות זה חלק מ-300 מיליון דולר, העלות להקמת התחנה. כל

החוזים שהיו לנו ביד מסתכמים לסוף 1993 בכ-650 מגוואט מתקנים סולריים, למעלה מ-95% מסה"כ הניצול של השמש להפקת חשמל נמצא באתרים שהוזכרו בקליפורניה.

לתכנון העתיד מדברים על פיתוח זור רביעי של קולטים. בישראל אנו ממשיכים לעבוד עם חברת החשמל. עד עכשיו זה לא היה כדאי מבחינה כלכלית, אבל יתכן שעכשיו כשנפתח תחנות של 200 מגוואט יתכן שזה יהיה אפשרי.

תחזית 1994-2000	
800 - 2000 מגאוט	סה"כ הספק
2000 - 4000 מיליון דולר	בה"כ מכירות
LS-4	טכנולוגיה
מכירה ישירה	אפי החוזה

הסיכון כאן שעדיין לא ניתן לדבר על תחנה במגוואטים כי היא לא עובדת 24 שעות ביממה. בפיתוח אנחנו עכשיו עוסקים בהפקת חשמל מהשמש במחיר של כ-6 סנט לקו"ט שעה. בתחנות משולבות אנחנו מדברים על מחירים של 5.7 סנט לקו"ט וצריך להשוות את זה למערכות יותר גדולות.

לגבי שמן [כקולט חום בקולטים], קודם כל רק להגיד שבזור הרביעי של הקולטים מדברים על המרה ישירה לקיטור כך שלא מדובר על שמן כלל. בתחנות הקיימות מעבר למערכות שמתפעלות את השמן באופן שוטף, התחלופה היא של כ-4% מהכמות הכוללת כל שנה ולגבי [עמידות הקולטים] לברד זה עמד בכדורי ברד של 3-5 ס"מ קוטר.

התחנה צריכה לעמוד באספקת אנרגיה על פי החוזים למשך 30 שנה. אחד הדברים שהתוצבו בשנים האחרונות, זה מערכת התפעול אם כי יש עדין תקלות. אנחנו בקצב פיתוח ונמצאים בתהליך של החלפת זורות קולטים. יש כרגע קשיים הקשורים למכירות ולהפעלת התחנות. החוזים האלה כוללים גם את הכסף שמקבלים עבור הפעלת התחנות, עד עכשיו אנו עומדים בזה.

מעורבות חברת החשמל לישראל באנרגיות חלופיות

יגאל פורת

מנהל מחקר ופיתוח - חברת החשמל לישראל

חברת החשמל לומדת את כל האנרגיות החלופיות. יש לנו מנדט לספק חשמל זול ככל האפשר בעלות נתונה. אבל אנו לא מתכננים למחיר אחד קבוע. יתכן בהחלט שחשמל סולרי יותר נקי וזול ומאחר ויש דרישות סביבתיות מפליגות, ויתכן שבמקורות הפיתוח יינתן אחוז מסוים לאותם מקורות אנרגיה שילך ויגדל. אנחנו עוסקים גם במו"פ של מקורות אנרגיה שונים, כורים גרעיניים וכו'.

נושא שני הוא פצלי השמן. אנו בארץ בעלת באוצרות טבע עניים. יש לנו כמויות גדולות של פצלי שמן ולכן חברת החשמל מאד מעורבת בנושא ובאמת בדקנו את הכדאיות של פיתוח תחנות כוח בניצול פצלי שמן. מדברים על מחיר כריה של 2.5 דולר לטון, וזה לא רקע אפילו ב-2.8 דולר לטון לעומת תחנות כוח אחרות. נראה לנו שצריך ללכת לפרויקט יותר גדול, היום חושבים על 4.5-5 מגוואט. חושבים שלקראת סוף 1996 או צריך להקים תחנה מדגמית של 60 מגוואט. אנחנו מעוניינים בנושא זה וחבל שאין בארץ תחנה כזו. זו לא רק שאלה כלכלית אלא גם בעיה של חוקים שונים. יש לנו הנחיות של משרדי האוצר והאנרגיה, ויש לבדוק את הכל מנקודת הראות של משק לאומי. בסופו של דבר עלות ייצור החשמל צריכה להיות המינימלית האפשרית לצרכן. חשוב להיות כל הזמן עם היד על הדופק, כדי שבתנאים מסויימים אפשר יהיה להכניס את הדברים לתקציב הפיתוח.

בנושא של אנרגית הרוח, עוסקים בו למעלה מ-10 שנים. אנו עושים מדידות בכל הארץ. לפני מספר שנים התקנו טורבינת רוח שהיתה אז הגדולה ביותר, 220 קילוואט שעובדת לשביעות רצון עד היום. אחרי אנרגית השמש, אנרגית הרוח היא הקרובה ביותר לכלכליות. שקלנו כבר לפני זמן מה להקים חמש יחידות בגליל יש שם רוח במהירות של 7 מ' לשניה וראינו שזה לא כלכלי. לעומת זאת בגולן יש משבים של 8 מ' לשניה והתוספת הזו מוסיפה כ-50% אנרגיה. זה מוריד את העלות בשני שלישי. הודענו למשרד האנרגיה שאם נקבל שם את האתר המסוים נרכוש מיד את הציוד המתאים ונקים תחנה.

אנו מפתחים אתר גדול ברמת הגולן, שלפי התכנון אפשר להכניס לשם 240 טורבינות רוח, וחושבים על 300 קילוואט לטורבינה, יש לנו בעיות חמורות של רישוי. יש הרבה גופים שרוצים את השטח, וחשבנו אולי לשתף את התעשייה האווירית, ולהזיז להם את עלות החשמל, יכול להיות שעל ידי הקטנת עלויות הייצור של הטורבינות, זה יהיה כלכלי.

נושא שני הוא אנרגיה סולרית. אנו מעורבים במספר פרויקטים סולריים, קודם כל במכון ויצמן. שם ישנו הקולט של טורבינת גז סולרית. במקום לסחוב סולר, אנו מעבירים אור דרך מוקד שבו רוכזה האנרגיה הסולרית, שם הוא מתחמם ל-1000 מעלות ונראה שיש עתיד לנושא זה. יש מרחב לפיתוח חומרים יותר טובים ונצילות יותר טובה ואם זה יצלח, נדע תוך זמן קצר. עכשיו יש טורבינת גז סולרית של 250 קילוואט.

נושא שני הוא אתר ניסויים סולריים בשדה בוקר. נעשים שם כל מיני דברים מעניינים, בין היתר גם המתקן שלנו של ארבעה קילוואט בערך. באמצעות של תאי שמש של חברת סימנס יוצרים זרם חשמלי בצורה ישירה. אנו בודקים ולומדים את הנושא, ביחוד היציאה ל-240 וולט זרם חילופין ובעזרת אינוורטרים, ומכניסים את האנרגיה לרשת החשמל. יתכן שבעתיד תהיה אפשרות שיהיו תאים פוטו-וולטאיים על הגג ואפשר יהיה לקבל אנרגיה חשמלית מהשמש וישר להתחבר הביתה. נכון שהדבר יקר כרגע, 10,000 דולר לקילוואט וזה בלי מתקני אגירה. השמש מאירה רק כמה שעות ביממה ואנו זקוקים לטווחים יותר ארוכים. אבל אנו צריכים להתכוון לא רק לעתיד קונבנציונלי, אלא גם לעתידים אחרים שנשמעים היום אולי לא רק כך ריאליים. אנו בודקים את הנושא ויתכן שניכנס לפרויקט שנקרא

"אלפיים סולרי" ונוכל לבדוק את התנהגות הצרכן עם מתקן כזה והשפעה של החשמל שמקורו בתאי שמש והוסב לזרם חילופין. השנה צפוי לנו הפסד, ואנו ממשיכים בינתיים בכל המחקרים, כוללפרויקט בשדה בוקר על משאבה לאנרגיה סולרית.

דברו כאן על אגירת אנרגיה - אנו עוסקים בהעברת הנושא לאגירה שאובה, וגם אגירה במצברים. יש לנו פה קשר מסוים עם רוסיה. בודקים דרך אפשרית בעתיד של אגירה אלקטרומגנטית. אגירה שאובה נפוצה מאד בעולם וזאת טכנולוגיה קונבנציונלית יחסית לאויר זחוס. כאשר בדקנו את מערכת השייך חשבנו שהעלות תהיה לא יותר מ-800 דולר לקילוואט. היום אחרי כמה שנים של מחקר מתברר שמדובר על 1200 דולר לקילוואט וזה משנה את התמונה. עדיין אנו ממשיכים לבדוק.

שאלה מהקהל: איזה אחוז מכל המערכת עובד כיום על אנרגיה חלופית?

יגאל פורת - היום יש לנו טורבינת רוח של 220 קילוואט, ואם נניח שתהיה לנו ב-2000 טורבינה של 100 מגוואט אני חושב שזה יהיה יפה מאד. אנו בודקים אפשרות יחד עם חברת לוז להפעיל תחנה סולרית של 200 מגוואט. זה תלוי במימוש ההוזלות שהם צופים, למשל קולטים יותר זולים, או המרה ישירה לא דרך שמן אלא דרך מים. בנוסף לזה במידה ויהיה תמריץ כלכלי לאנרגיה נקה, יכול להיות שהדבר יהיה כדאי משיקולים כלכליים ואחרים.

ד"ר דן וינר - חברת החשמל לישראל: אחת המסקנות לגבי אינורטרים [להמרת זרם ישר לחילופין], שזה כביכול טכנולוגיה בדוקה, הוא גם כן חוליה חלשה בשרשרת, ביחוד כשהרשת לא כל כך טובה. יש הרבה דברים לשפר באמינות אספקת החשמל מתאים פוטו-וולטאיים.

ד"ר אברהם ארביב, משרד האנרגיה והתשתית: - בכפר כליל בגליל כל החשמל מסופק על ידי מערכות פוטו-וולטאיות. זה כפר שלא מחובר לרשת הארצית. יש כעשרים מערכות ביתיות, הן היו מתוכננות לספק 2.5 קילוואט שעה ביום למשפחה. הניסוי נבע מרצון התושבים לא להתחבר לרשת החשמל מסיבות אידיאולוגיות של חיים בטבע. הניסוי הזה אינו אופייני או מייצג. התברר ש-2.5 קילוואט שעה זה ממוצע לשנה, בחורף זה 1 או 1.5 קילוואט שעה. בקיץ קצת יותר. זה אורח חיים סגפני שלא מתאים לרוב האוכלוסיה. המערכות עובדות ומשפחות חיות בתנאים אלה.

מעורבות חברת פז בניצול אנרגיות חלופיות

ד"ר איתן יניר

מנהל מחלקת פיתוח עסקים - פז בע"מ

קיימות שתי גישות - אחת היא שבני ישראל הציעו להם את התורה אמרו: "נעשה ונשמע" - קודם תן את התורה, אחר כך ונשמע ונראה איך זה הולך. והשניה - "סוף מעשה במחשבה תחילה". איך פועלת אנרגיה סולרית? יש בעיה של מעגל קסמים מסוים. בסה"כ כל הנושא של אנרגיה חלופית הוא בטכנולוגיה חדשה, וקשה לטכנולוגיה בת 15-10 להתחרות שנה בטכנולוגיה בת 100. זו הבעיה של חברות מסחריות - ואלו קשיי למידה.

בפז עוסקים באנרגיה חלופית בנושא קירור ספיגה. בהסתמך על טכנולוגיה שפותחה באוניברסיטת באר שבע פיתחנו מתקן לקירור ספיגה שמנצל חום בטמפרטורה נמוכה. למשל אפשר להשתמש בטמפרטורה של 75 מעלות לקירור - למינוס 15 מעלות. מעגל הקירור הוא מוכר יחסית. בגנרטור יש נוזל אורגני, פריאון 22, הרוחה בעזרת חומר שמגיע ממתקן כלשהו. יש חלק שמקרין חלק מהסיפופות של הנוזל האורגני, וזה נמצא בלחץ של 12 אטמוספירות בצורת נוזל, עובר למאייד, מתפשט, אוסף את החום ונכנס לאינג'קטור כאשר התמיסה העניה האורגנית שממנה הוצאנו את הפריאון דרך מחליפי חום עוברת לאינג'קטור ופה חל חלחול ספיגה של הפריאון בנוזל האורגני. כאן חלה הספיגה הסופית, והשכבה העשירה שמכילה את הנוזל האורגני עוברת דרך מחליף החום אל הגנרטור. זה הספור הקלסי של קירור ספיגה.

אני רוצה להשוות את הטכנולוגיה שלנו עם הטכנולוגיה של קומפרסיה קונבנציונלית. ההשקעה במכונה עצמה, בלא הציוד הסביבתי של הקירור, הוא אחד ל-1.6. אנו יותר זולים בציוד היסודי. כולל הציוד הסביבתי - המחירים של הקירור בקומפרסיה יותר זולים ב-5% מקירור בספיגה. לכן המטרה של קירור ספיגה, לא ליצר מכונת קירור יותר זולה אלא תפעול יותר זול, כי משתמשים בה בחום שיורי.

ניקח למשל את צילוב התפעול של מתקן קירור ספיגה מול קומפרסיה. צריכת החשמל 0.15 קילוואט לטונה של קירור בספיגה לעומת 1.25 קילוואט לטון קירור בדחיסה. אם נחשב לפי 6.6 סנט לקווס"ש נראה את ההבדל העצום במחיר בין קומפרסיה לספיגה. פה אני רוצה לקרר ע"י מים. אם מים עולים 30 סנט למ"ק, אז נכון שיותר יקר לקרר בעזרת המים. סה"כ מענינת העלות הכוללת - 1.41 סנט לטון קירור במכונת קירור ספיגה מול 8.9 סנט. ההבדל הוא 7 סנט. זה משמעותי מאד למי שיש חום שיורי. מכונה של 40 טון קירור, שיכולה לקרר חדר זי גדול, חוסכת כ-20 אלף דולר אם מנוצלת 7000 שעות, לפי מחירי החשמל שלעיל. מכונה כזו יש בבתי הזיקוק ובאתר הנסויים בשדה בוקר, ואנו עומדים לשים אחת בפי גלילות. אנו עוסקים בשיפור רציני של המכונה. התחלנו בבתי הזיקוק במכונה גדולה ועברנו למחליפי חום מוכנים שהוזילו אותה פי שנים והקטינו את הממדים שלה פי שנים. הדבר היחידי שגוזל חשמל בנוסף למשאבה של מי הקירור, היא המשאבה שמסחררת את התערובת עם הנוזל האורגני.

בנושא הסולרי - החלטנו בפז לעבור לנושא של מכירת אנרגיה. לאנשים אין כסף לקנות מערכות. היות ואנו חברת אנרגיה ראינו את הנושא הסולרי גם כן כנושא מכירת אנרגיה. אנו בודקים את הצרכים של הלקוח, מציעים לו מערכת סולרית, ומפתחים איזו שהיא נוסחה של מערכת. מתחילים ללקוח שלא ישלם יותר מאשר שילם בעבר, אלא אם הוא מגדיל את הצריכה, ונותנים לו 15% הנחה. זה כדי לראות במשך השנים איך עובדת מערכת סולרית, וכמה אנרגיה היא נותנת. מעקב הוא חשוב.

ב-1989 התחילה הרפורמה במשק הדלק, ואז החלו התהפוכות כי הלקוח דרש 15% מהמחירים הנמוכים של המתחרים שהם בעצם 25% הנחה. לכן חוזה כזה לא יכול להחזיק מעמד מול המציאות.

יש לנו עשרה מתקנים למכירת אנרגיה סולרית. אני הוגל שלנו הוא בית החולים הלל יפה בחדרה. שם הקמנו מתקן של 400 קולטים מרכזים פלוס מראות שמיצרות קיטור. אנו למעשה מספקים את כל צרכי האנרגיה של בית החולים כל השנה. למעט ארבעה חודשי החורף, שבהם אנו מגבים בעזרת גז את המערך הסולרי, אנו מצליחים לספק את כל האנרגיה לכל השנה. הם מקרה מיוחד, שהרי הם השתמשו בסולר, בתקופה שבנו את בית החולים, בשנות הששים. אז למחירי האנרגיה לא היתה משמעות רבה, והקימו את הבוילר רחוק מבית החולים, דבר שגרם לסחרור של מרחקים ארוכים של קיטור ומים חמים, ולניצולת ירודה של 30%. אנחנו הקמנו את המתקנים קרוב למקום הצריכה ומצליחים לחסוך כמויות משמעותיות של אנרגיה.

הקולטים שנקראים תרמוסיט - קולטים מרכזיים שמגיעים ל-90 מעלות, לחימום מים חמים. יש כאלה 400 בבית החולים, חלקם מפוזרים ונותנים מים חמים. ישנו ביתן האנרגיה שהיה קיים, וישנם שם ארובות תנורי הגז לגיבוי בחורף. לקולטים הסולריים לייצור הקיטור, יש מראות העוקבות אחרי השמש. במתקן אחר בכפר בלום - אם למשל המערכת של תרמוסיט היא 250 דולר למ"ר, עם הקולט והמערכת מסביב, ההחזר הוא בסביבות 7-8 שנים. אנו מוסיפים קולטים של קיבוץ מגן. בדרך כלל משתמשים בבריכות לאגירת חום, ועושים חימום מוקדם על ידי הקולט הזה, ומעלים את הטמפרטורה לכ-80 מעלות. כאן יש לנו חדר משאבות עם בוני אנרגיה. הקולט הזה עולה להרכיב אותו 50 דולר למ"ר, היחס הוא כ-60%-55 קולטים הנטרפול, ו-45% תרמוסיט, וסה"כ מגיעים לעלות של השקעה של 150 דולר למ"ר כולל מיכל האגירה. ההחזר תוך 4 שנים. זה יכול לענין קונה לקנות מערכת כזו ולא רק אנרגיה.

פרופ' גרשון גרוסמן, הנדסת מכונות, הטכניון - למיטב ידיעתי מקדם הביצוע של המכונה הזו הוא בערך חצי. איך יתכן שמערכת כזו שיש לה שטח מעבר חום כמעט פי 3 יותר מאשר למערכת עם קומפרסור, עולה יותר בזול.

דר' איתן ינר, - יכול להיות שמתח הרווחים של המערכת עם הקומפרסור יותר גדול. קשה להשוות בין המכונות, כאן הכל מחליפי חום ושם זה מנוע, קומפרסיה, וזה דבר אחר לגמרי.

פרופ' גרשון גרוסמן - במערכת שלכם יש גנרטור ומחליף חום זכו' וכל הדברים האלה הם עלות רצינית. להם יש קומפרסור ומנוע.

דר' איתן ינר, - אני דברתי על המכונה ללא ציוד מסביב. עיקר העלות שלנו הם מחליפי החום. במקום שאנחנו נתכנן את מחליפי החום מוטב לקנות מחליף חום קבוע, שמעברי החום יהיו יותר גדולים. מחליפי חום מהמדף הרבה יותר זולים מאשר בייצור מיוחד. כך שהנקודה הזו שאתה קונה מחליף חום מהמדף מוזילה את המערכת.

פרופ' גרשון גרוסמן, - מחליף חום מהמדף לא יכול להיות סופג חום.

דרי' איתן יניר, - אני כן משתמש במחליף החום כסופג. האינג'קטור מערבב את הגז עם הנוזל האורגני וסוף הפעולה נעשית בקולט שהוא למעשה מחליף חום פלטות. אני צריך שסחי מעבר חום עצומים. כאן המתקן של הפלטות קומפקטי וקטן. לא משתמשים בעדשות פרנל. אצלנו זה מעגל סגור. פעם בחמש שנים פותחים ומחליפים את הדרוש החלפה וקל מאד לנקות.

אנרגית הרוח

פרופ' אביב רוזן

הפקולטה להנדסת אוירונטיקה וחלל – הטכניון, חיפה

נעבור במהירות על כמה הבטים של אנרגית הרוח. בשלב ראשון נתחיל בנושא הפוטנציאל של אנרגית הרוח. אם עושים מאזן גלובלי, כלומר מעריכים כמה אנרגיה נכנסת לכדור הארץ איזה אחוז ממנה מתבטא כאנרגית רוח (מאחר שאנרגית הרוח היא היבט אחר של האנרגיה הסולרית), מסתבר שאפשר לכסות את כל צריכת החשמל העולמית בעזרת אנרגית הרוח. אך מאחר וחלק גדול של כדור הארץ מכוסה באוקיינוסים, לכן יש לנקוט בגישה קצת יותר מפורטת ולבדוק שלא מציבים טורבינות רוח במרכז ערים מיושבות שהם אולי איזורים טובים מבחינת הרוח אך אינם מעשיים לניצול. לאחר הבדיקה הזו וסילוקן של כל האתרים ה"ימיים" off-shore (למרות שבשודיה החל הקיץ לפעול האתר הראשון המצוי בלב הים), עדיין ניתן לספק את כל תצרוכת האנרגיה העולמית תוך שימוש באנרגית רוח. במציאות חזיון כזה הוא עדין בגדר חלום. מסתבר שלרשת חשמל קיימת אי אפשר להכניס חשמל מאנרגית רוח בהיקף העולה על 10-20% מהצריכה מבלי לשנות את הרשת.

יתרונותיה של אנרגית הרוח בכך שאינה גורמת לכל פליטת גזים הגורמים לאפקט החממה, אין כל תרומה לגשם חומצי ולא נפלט CO₂. לכן מקובל היום לדבר גם על "חסכון מחיר נוסף" (avoided external cost) כתוצאה מכך שלא נגרם נזק סביבתי. באירופה נוקבים בערך חסכון מחיר נוסף של 0.04 ecu/kWh ונהוג להתחשב בערך זה. לא ברור אם בישראל מישהו מתחשב בשיקולים מסוג זה.

נדגיש מספר נקודות בקשר להיבטים סביבתיים. אין עוסקים כיום ברצינות בטורבינות בודדות אלה מדברים על חוות טורבינות. חשוב לראות את ניצול השטח של חוות טורבינות רוח ביחס לניצול השטח של אנרגיות אחרות. בענף לגבי אנרגיות אחרות מדובר על ניצול כל השטח, בחוות טורבינות רוח מדובר על ניצול 1.5% מהשטח בלבד ובחווה מודרנית מדובר על ניצול 1% סה"כ. ברוב השטח הנותר ניתן להמשיך ולהשתמש למטרות חקלאות או לצרכים אחרים.



אחד הנושאים החשובים שמדברים עליהם היא בעית ההסכמה הציבורית לחוות הרוח. מסתבר שהפגיעה בנוף היא נסבלת. בכל מקרה לא מדובר על הקמת חוות רוח באיזורים מיושבים בצפיפות. הנושא של פגיעה בבעלי חיים גם היא נבדקה ונמצא שלהקות של חסידות יודעות להסתדר יפה עם חווה של טורבינות רוח ולא נמצא מספר גבוהה יותר של

ציפורים פגועות מאשר מעמודי מתח גבוהה הפזורים בכל מקום. נושא נוסף בהסכמת הציבור נוגע לרעש. היו בעיות רעש עם טורבינות שונות, אך מסתבר שבעזרת תכנון נכון הרעש ניתן להפחתה. טורבינות טובות אינן מרעישות. ליד הטורבינה קיים רעש אך במרחקים סבירים רעש זה יורד לרמות מקובלות. כמו כן חוות טורבינות יכולה לפגוע בשידורי טלוויזיה, אך על כך מתגברים בקלות יחסית ע"י התקנת רשת כבלים בעלות נמוכה יחסית. בעיה נוספת שנבדקה היתה בעית הבטיחות. חשבו על היווצרות גושי קרח על להבי הטורבינה והסתם למרחקים גדולים. מסתבר שעד היום נמצא לדבר פתרון והנסיון הבטיחותי של חוות טורבינות הוא טוב מאוד.

באשר לשיקולים הכלכליים. מחיר אנרגיית הרוח נקבע ע"י עצמת הרוח. ההספק פרופורציוני לחזקה השלישית של מהירות הרוח, כך שעליה קטנה בעצמת הרוח פירושה עליה גדולה בהספק המופק. מחירי האנרגיה תלויים בצורה חזקה בבצועי הטורבינה (כלומר יעילותה) ומחירה. לצורת המימון (רבית, משך התשלום), השפעה ישירה על מחירי האנרגיה. כמו כן קיימת בעיות שעות הזמינות של אנרגיית הרוח. אתר המספק את מירב האנרגיה בשעות השיא כדאי יותר מאתר המספק אנרגיה בשעות השפל.

מחיר החשמל כפונקציה של אחוזי ריבית שונים עבור הלואה ל-20 שנה.

הגדרת המיקום החוזה	מהירות הרוח מ/ש	אחוזי החזר נדרשים להלואה ב-ecu/kWh			
		15%	10%	8%	5%
בינוני	6.5	0.108	0.083	0.074	0.061
טוב	7.5	0.088	0.067	0.060	0.050
טוב מאוד	8.5	0.060	0.046	0.041	0.034

מוצגת טבלה במטבע של השוק האירופי המשותף, של מחירי חשמל המופק מהרוח. מדובר בשלושה סוגים של רמות רוח: רוח "בינונית" המתיחסת לממוצע שנתי של 6.5 מ"ש, רוח טובה המתיחסת לממוצע שנתי של 7.5 מ"ש, ורוח טובה מאוד של 8.5 מ"ש. הרוחות נמדדות בגובה טבור הרוטור. הטורבינות מותקנות בהלוואות ל-20 שנה ברמות שונות של רבית. לשם השוואה נקח את המקרה הגרוע ביותר של רוח בינונית. בארץ לא מדובר כלל על ניצול אתרים עם פוטנציאל רוח כזה. עבור רבית של 8% נקבל שמחיר האנרגיה תהיה 0.074 ecu/kWh. אם נשווה זאת לאמצעי הפקת אנרגיה אחרים, הרי בתנאי מימון דומים האנרגיה הגרעינית בבריטניה עולה ב-1990 0.073 ecu/kWh בעוד שאנרגיה מתחנת כח המונעת בפחם שוב באותם תנאי מימון היא 0.056 ecu/kWh. אם נקח בחשבון גם ערך נמוך יותר של חסכון מחיר נוסף של 0.03 ecu/kWh נקבל שאנרגיית הרוח היא 0.074 - 0.044 = 0.03. זה כמובן מחיר נמוך משמעותית ממחיר חשמל מתחנת פחם. ושוב אם נבחר אתרים עם רוח יותר טובה, אנו גם נשפר את הכדאיות. למעשה אנרגיית הרוח נחשבת לכלכלית ביותר מכל האנרגיות החלופיות.

נעבור בקצרה על היבטים טכניים. למרות שאנרגיית הרוח היתה בשימוש משך מאות בשנים, מדובר כיום בטכנולוגיה חדשה יחסית. בעשר השנים האחרונות חל שיפור ניכר בטכנולוגיה. השיפור התבטא בעלית ביצועי הטורבינה ומחיר המערכת ירד כמעט לשליש. אין לצפות לאותו קצב שיפור בעשר השנים הבאות, אך אנו נמצאים על עקומת ההשתפרות. נושא אמינות הטורבינהגם הוא חשוב. בתחילת העשור אמינות הטורבינות הטובות היתה 60%, אך כיום היא נמדדת ב-95% ויש טוענים שגם יותר. הצפי הוא שהשיפור בטכנולוגיה יוריד את מחיר האנרגיה בשנים הקרובות ב-20% נוספים וזה ישפר בצורה דרמטית את הכדאיות הכלכלית.

מבחינת המתקנים עצמם, הטורבינות היעילות ביותר המצויות היום בשוק הן של 300 ק'וואט. אלו מתקנים בקוטר של 25 מטר. החישובים מראים שהגודל האופטימלי לטורבינה הוא 500 ק'וואט. האמריקאים התרכזו בעיקר בטורבינות הגדולות ואילו האירופאים החלו בטורבינות קטנות. הבעיות הטכניות העיקריות של הטורבינות הן בעיות אמינות. הטורבינות מתוכננות לעבוד ללא בעיות לאורך 20-30 שנה. במציאות יש כמובן בעיות, אך עם השנים איכות הטורבינות הישתפרה.

כדאי גם להצביע על שלושה סוגי שימוש בטורבינות רוח. השימוש הראשון הוא חיבור לרשת החשמל של ארץ מפותחת, כפי שאנו מכירים בארץ. הסוג השני הוא חיבור לרשת של ארצות מתפתחות. התנאים בארץ של אתרים כמו אלון-מורה ובית-יתיר הם אתרים שבקצה רשת החשמל, בהם הרשת לא יציבה. תנאים אלו דומים לרשת המקובלת בארצות מתפתחות. למשל בחינת הספקת האנרגיה בבית-יתיר מראה שהיא נמוכה מהמצופה, משום שבמרבית השעות שבהם היתה רוח חזקה, לא פעלה רשת החשמל ולכן אי אפשר היה לספק לה אנרגיה. ישנה שם קורלציה ישירה בין הזמנים בהם יש רוח טובה, לזמנים בהם יש בעיות ברשת.

סוג שלישי של שימוש בטורבינות רוח הוא באתרים מבודדים ללא חיבור לרשת חשמל. זה שוק גדול יחסית שבהם הטורבינות פועלות במקביל לגנרטורים הפועלים על מנועי דיזל או אחרים. שוק זה עשוי לעניין יזמים ישראלים המחפשים נישות מיוחדות שאין עליהן קופצים מידי חברות הענק הבינלאומיות.

ישנה התפתחות רצינית בשטח הרוח בארצות חוץ. למשל בדנמרק יש כיום 2000 טורבינות המיצרות 2% מצריכת החשמל. עד סוף המאה הדנים מתכננים לספק 10% מצריכת החשמל בעזרת אנרגית רוח. בשאר ארצות אירופה מקוים להגיע לאותו אחוז תוך 40 שנה. בקליפורניה 1% מהחשמל מופק מאנרגית הרוח ומקוים להגיע עד 2010 ל-3%.

איתור שטחים לחוות רוח

תחום הקו הירוק

מספר הטורבינות והספק כולל לפי תפוקת הטורבינות						שטח קמ"ר	מספר האתרים	סוג לפי עוצמת הרוח מ/ש
1000 ק'וט לטורב		500 ק'וט לטורב		300 ק'וט לטורב				
הספק מותקן מגוון	מספר	הספק מותקן מגוון	מספר	הספק מותקן מגוון	מספר			
153	153	111	222	91.5	305	10	28	א' 7 <
480	480	340	680	270	900	39	28	ב' 6.5-7.0
248	248	180	360	141	470	20	22	ג' 6.0-6.5

יהודה ושומרון

500	500	3740	748	300	1000	40	בלתי מסווג
1381	1381	1005	2010	802.5	2675		סה"כ

בארץ הצביעו על מספר אתרים משמעותי בהם הרוח טובה. האתרים הטובים ביותר הם בגולן. הוקמו 5 טורבינות הדגמה שבעזרתן נלמד הנושא. ניתן להתקין על פי הסקרים בחלק מהאתרים חוות רוח על בסיס כלכלי לטווח רחוק, בהספק כולל של 1000 מגוואט.

ד"ר איתן ינר, חברת פז - רוב האתרים הטובים נמצאים תמיד בקצות הרשת. בטורבינה שלנו התברר שבחודש ימים יש 35 הפסקות חשמל. כל הפסקה פרושה עצירת הטורבינה ויש לחכות 5-10 דקות שהחשמל יתחדש. יש לבדוק היטב עם חברת חשמל את מצב הרשת לפני התקנת טורבינות.

שאלה מהקהל - האם היו ניסויים לניצול אנרגית רוח עם בלונים, ובאילו מקומות בעולם?

פרופ' אביב רוזן - ישנן רוחות אדירות בגבהים גדולים שזה עדיין בגדר חזון ולא כלכלי. כיום יש משהו על גבול הכדאיות חשוב מתי יש רוח, וזה קובע לפעמים איזה אתר עדיף.

יגאל פורת, חברת החשמל - בארץ אנו מחויבים לרכוש אנרגיה מיצרנים הנקראים יצרנים מאושרים. בארה"ב זה מה שנקרא Qualified facilities, משרד האנרגיה לוחץ חזק שנרכוש חשמל במחיר יותר גבוה מהמחיר לצרכנים. אנו מוכרים חשמל לצרכנים לפי תעריף תעו"ז - תעריף עומס וזמן. צרכנים גדולים, תעשייתיים בעיקר, אם הצרכן מקים מתקן גנרציה, אנו משלמים לו הרבה יותר. בארצות שונות בדרך כלל חברה משלמת פחות מתעו"ז מפני שיש לחברת החשמל הוצאות נוספות. צריך לתת לו גיבוי אם המתקן לא פועל, מה גם שיש לו זמינות יותר קטנה מאשר לתחנות כוח. יתכן שהמצב ישתנה, יקנו את זה אולי בשלב ראשון בתעו"ז ולא בתעו"ז פלוס 15%.

ד"ר איתן ינר, חברת פז - אני רוצה לציין שהיום אין כלל הרבה תקלות בטורבינות. הבעיה היא הרוח. באתרים בהם מוצבות הטורבינות אין מספיק רוח. בגולן זה המקום היחיד שיש רוח כלכלית.

אנרגיה מביומסה

פרופ' גדליה שלף

הפקולטה להנדסה אזרחית - הטכניון, חיפה

ביומסה היא משקע ביולוגי. כוללים בביומסה כמה דברים. זלק פסילי בתור פחם, והוא גם כן בבחינת מסה של תהליכים פוטוסינתטיים של צמיחה או אצות קדומות. קל להגדיר את הביומסה במושגים של אורך החיים שהם ימים, חודשים, שנים. כוללים גם כריתת עצים, חלקם בני מאות שנים. בברור תעמוד לדיון הבעיה האקולוגית של שימוש בביומסה להפקת אנרגיה.

לרוב הנושאים יש היבט סביבתי. כיון שמדברים על ביומסה, ומכיון שחומר אורגני מופיע אצלנו כחומר אורגני טרי, לא זה שיצר לנו פחם, כגורם סביבתי, גורם זיהום וכחומרי פסולת. במקרים רבים קושרים את נושא הביומסה לנושא של פסולת ואיכות הסביבה.

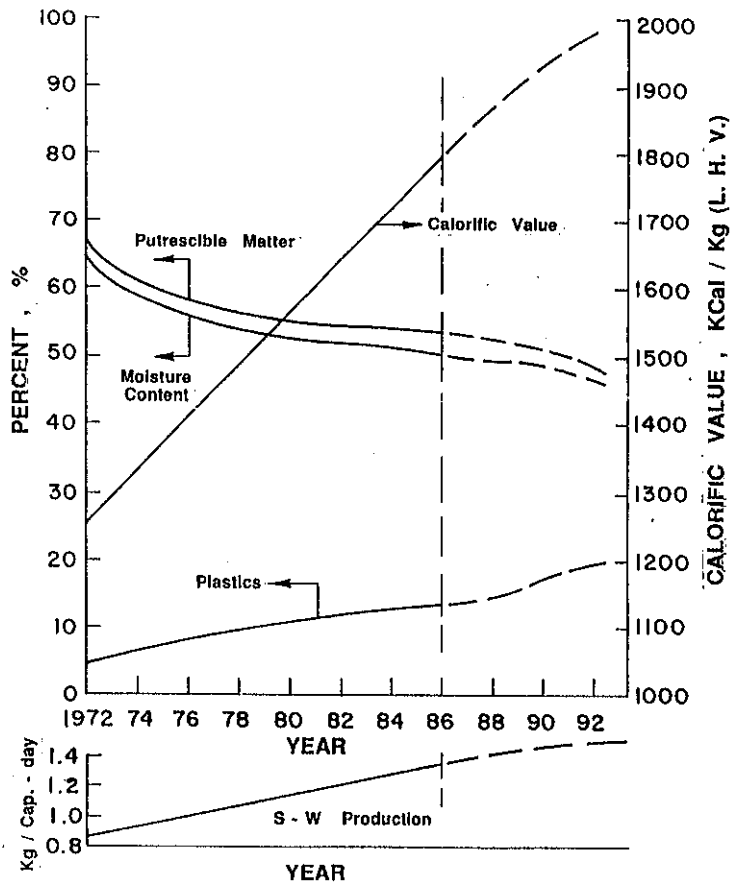
מקורות חומר אורגני בישראל כ-700,000 טון באשפה העירונית לשנה. זה לא סה"כ האשפה העירונית, אלא חומר אורגני כפסולת עץ וגיזום, וכמליון וחצי טון פסולת חקלאית אורגנית, זבל בעלי חיים ופסולת צמחית. במשך השנים התבססו הרבה על גבעולי כותנה באשפה החקלאית, אך היום הכותנה הולכת ונעלמת.

ישראל מוצפת באשפה. אשפה היא בעיה אקולוגית. אחד הביטויים אצלנו הוא For you it's shit, for us it is splendid. חלק מתכנית המתאר הארצית לפרתון בעית הפסולת המוצקה, קרוב לשני מליון קוב. מבחינה כללית המשקל הנפחי של אשפה טריה הוא כ-0.2 מסה'כ, כלומר האשפה הכוללת מהווה פי חמישה מהאשפה הטרחה. באשפה יש חומר אורגני רב. בארה"ב מדובר על 3 ק"ג אשפה לנפש ליום. ייצור האשפה מראה על רמת חיים ותרבות הצריכה ובסוף העשור נגיע בישראל לכמות האשפה שארה"ב יצרה לנפש לפני 20 שנה.

הרכב של פסולת מוצקה

חומר	% משקלי בארה"ב	% משקלי בישראל
רקבובית	15-35	60-72
ניר וקרטון	30-55	14-22
מתכות	6-11	3-6
זכוכית	5-11	1-3
פלסטיק וגומי	1-6	4-9
סמרטוטים	1-5	2-5
אפר ואבק	2-10	2-5
רטיבות	18-32	50-72
משקל	1.8-3.0 Kg/c-d	0.8-1.3 Kg/c-d
צפיפות	.14-.19 m.tons/m ³	.2-.25 m.tons/m ³

הגג העליון שהגענו אליו הוא כ-2000 ק"ג, כולל העתונים של סוף השבוע. באשפה חלה עליה גדולה בחומרים הפלסטיים. לישראל התכולה הגבוהה ביותר מכל הארצות המפותחות בחומר רקבובי של פסולת ירקות ופירות. יש לנו זיאטה הבריאה ביותר מכל הארצות המפותחות מבחינת ירקות ופירות. עם השנים הכמות של החומר הרקבובי יורדת אבל עדיין גבוהה.



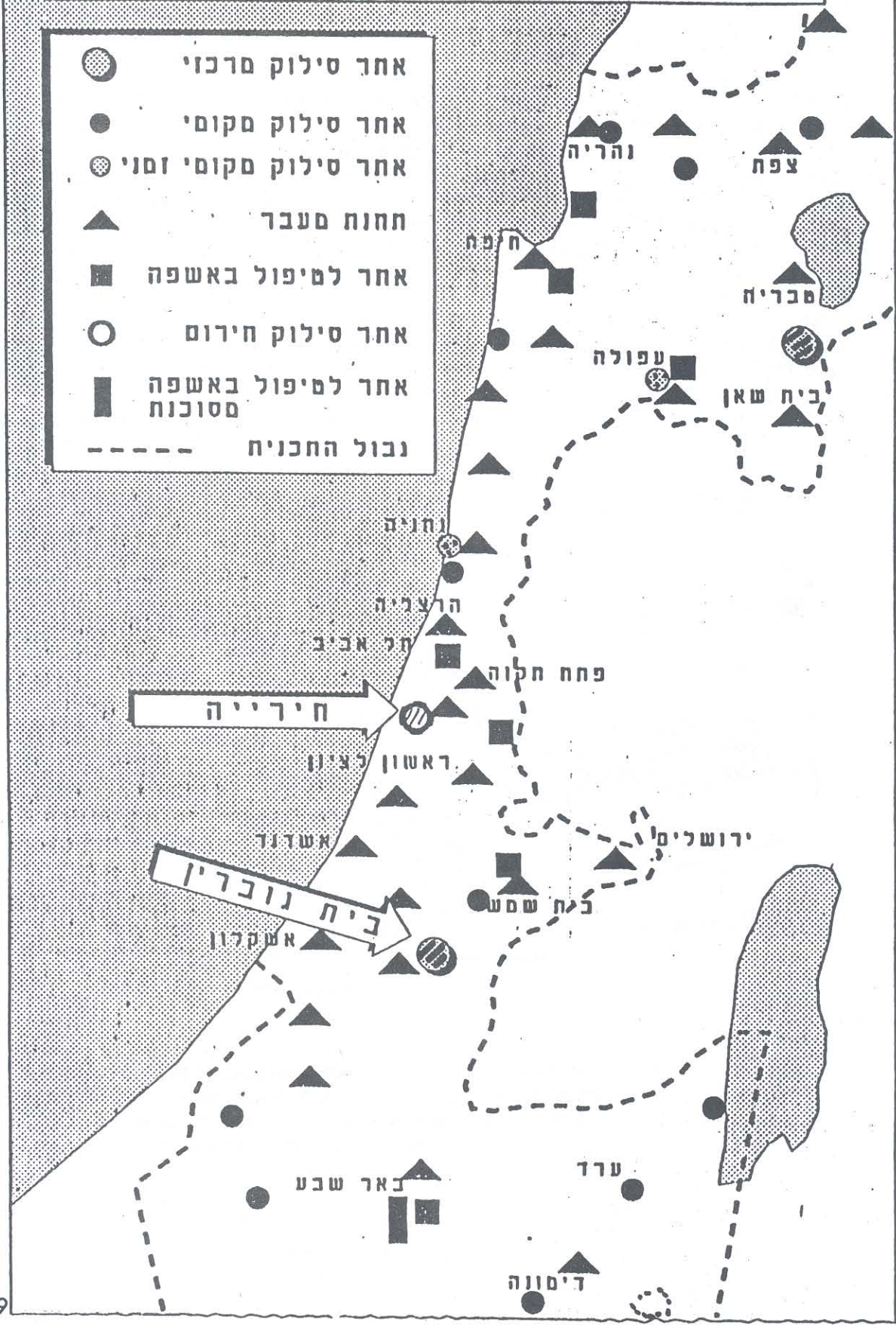
גם אחוז הרטיבות הולך ויורד עם השנים מ-62% בשנת 1970 ל-50% ב-1990. אחוז נזה עדיין גבוה מאד בהשוואה. הנקודה החשובה היא עלית ערך ההסקה של האשפה, שהתחילה במדידות הראשונות ב-1975 בקצת מעל אלף קילוקלוריות ומגיעה ל-2000 קילוקלוריות לק"ג אשפה רטובה ב-1990. זה מכניס את נושא שריפת האשפה. רשות מקומית שיש לה מזבלה קרובה, העלות לסילוק האשפה היא בין 3 ל-6 דולר לטון. במרחקים יותר ארוכים זה מגיע בין 6 ל-15 דולר לטון. בתכניות הנוכחיות של הובלת אשפה למדבר יהודה מדברים על 15 ל-30 דולר לטון. גם בעפולה העלות מגיעה ל-15 עד 20 דולר.

בנושא השריפה, בעיקר בייצור קיטור וחשמל מדברים על עלות לרשות המקומית, כמה הרשות צריכה לתת לשעה, כמה אשפה נכנסת, כסובסידיה ליצרן החשמל, עבור עלות פינוי האשפה. אני מאמין שהמשרפה הראשונה תפעל לקראת סוף העשור הנוכחי.

טכנולוגיה נוספת שעבדנו עליה בטכניון בשנים האחרונות שוב קשורה לאשפה. יצור אלכוהול לצרכים תעשייתיים כי האלכוהול עשיר באנרגיה. פרויקט זה מומן במשך שנים רבות על ידי חברת פז. הכוונה לקחת את החלק הצלולוסי באשפה, לעשות לו הידרוליזה חומצית כימית, בתהליך שלמדנו מהידרוליזה של נסורת מאוניברסיטת ניו יורק, ושיפרנו אותו כדי שיתאים לאשפה, והחלק הביולוגי שבענין הוא פרמנטציה בעזרת שמרים, שמרי אלכוהול או שמרי יין, ובזיקוק זה הופך לאלכוהול נקי. יש בישראל כ-690 אלפי טונות פסולת עתירת צלולוז באשפה העירונית, כ-285 אלפי טונות פסולת עץ וכ-1485 אלפי טונות של פסולת חקלאית, כלומר סה"כ כ-2460 אלפי טון חומר צלוליטי יבש בשנה.

תכנית מיחאר ארצית לסילוק אשפה

- אחר סילוק מרכזי
- אחר סילוק מקומי
- אחר סילוק מקומי זמני
- ▲ חחוח מעבר
- אחר למיפול באשפה
- אחר סילוק חירום
- אחר למיפול באשפה מסוכנת
- - - נכול החכניה

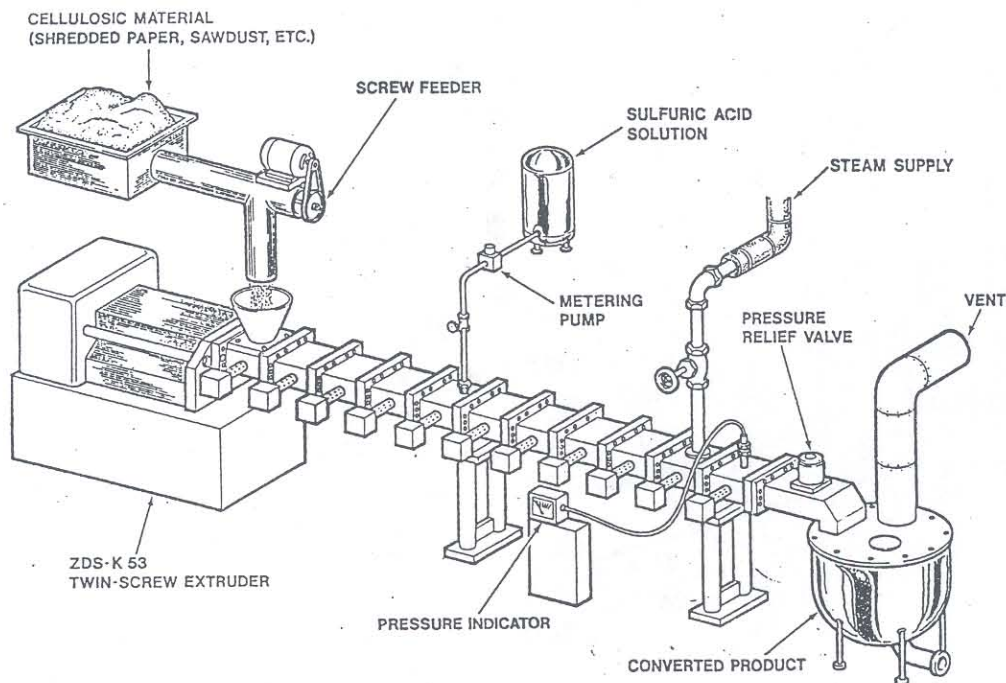


מהחומר הצלוליטי ניתן להפיק 190 אלף טון אתנול בשנה שיכול לשמש כתוספת לדלק.

הנושא המרכזי הוא שיש בעל בית לאשפה שמוכן לשלם סכום די נכבד עבור כל טון אשפה שיסולק. פילדלפיה הוציאה מכרז שהמינימום ליצרנים כדי לקחת אשפה מהעיר פילדלפיה הוא 193 דולר לטון אשפה, כי אין להם מקומות סילוק ויש איסור קבירת אשפה ברדיוס גדול מאד מן העיר.

בנושא מיחזור אנרגיה זו עלות המפעל. נניח עלות מפעל שריפת אשפה, או מפעל תסיסה ביולוגית של אשפה, המחיר הולך וגדל. בארה"ב התחילו בשרפת אשפה לצורך יצירת אנרגיה, וביפן נהוג כבר הרבה שנים לעשות זאת ויש אומרים שיש שם 400 מפעלים ליצור אנרגיה מאשפה. ככל שאני משקיע יותר אני מקטין את הנזק, ובו זמנית יוצרים חום. המחיר נבדק לא רק נגד הרווח החיובי שמקבלים, נניח אנרגיה, אלא גם מניעת נזק. קשה להעריך את ערך הנזק. לא כל אחד משלם עבור הנזק ולא כל מקום רואה את הנזק באותה צורה. עיריית חדרה לא רואה, למשל, את הנזק שלה במזבלה שמסריחה את כביש החוף ולכן היא לא תשלם כלום עבור מניעת הנזק הזה.

טכנולוגית הידרוליזה של אשפה, כדי ליצור סוכרים שעוברים פרמנטציה, קשורה באקסטרודר, שמשתמשים בו בתעשית הפלסטיקה. מדובר על בורג כפול, שמכניסים לו חומצה בריכוזים נמוכים, בטמפרטורה ובלחץ גבוהים, ומקבלים בסוף התהליך שלוקח מספר שניות סוכר שיש לו ריח. מתחיל בריח אשפה חריף, ונגמר בריח של קרם קרמל, כי הסוכרים עוברים קרמליזציה. מזה עושים אלכוהול שיש לו צבע חום. (ראה ציור של המכשיר).



התהליך הזה נבדק באמריקה והאשפה האמריקאית שונה מהישראלית. מ-770 ק"ג חומר יבש בארה"ב אפשר לקבל 300 ק"ג צלולוזה. עושים הידרוליזה, מקבלים כ-183 ק"ג גלוקוזה מהם אפשר להפיק 83 ק"ג מתנול או 104 ליטר אלכוהול אחר ללא מים. זה יכול לשמש דלק למכוניות או לייצור תעשייתי אחר.

מדברים גם על תהליך ביולוגי אחר לטיפול בחומר אורגני - תסיסה אנארובית. תהליך התסיסה הוא עתיק בטבע, חלק ממעגל ההתפרסות של אורגניסטים בטבע היוצרת ביו גז, שהוא כ-65% מתן, וכ-35% זו תחמוצת הפחמן. על ידי בקטריות מפרקים את הסוכרים לקבוצות אורגניות, וקבוצות אורגניות על ידי בקטריות אחרות שמפרקות למתן וזו תחמוצת הפחמן. עבדנו בטכניון הרבה על הבקטריות התרמופיליות שעובדות בטמפרטורה אופטימלית של 55 מעלות צלזיוס לעומת בקטריות מזופיליות העובדות בטמפרטורה נמוכה יותר. אנחנו רואים שאנחנו יכולים כמעט להכפיל את ייצור הגז. כשהטמפרטורה מגיעה ל-55 מעלות, על ידי שימוש בבקטריות תרמופיליות, ובזה עבדנו על אשפה עירונית, פסולת חקלאית, זבל עופות, זבל בקר. בארץ עובדים על ייצור ביוגז ומיצרים דשן אורגני לחממות, עבדנו על פסולת חזיריות בארץ ובאיטליה.

בין שאר נושאי הבימוסה יש להזכיר את נושא האצות. הכוונה שאצות, בעיקר מיקרו אצות ומקרו אצות שהיעילות הפוטוסינתטית שלהם גבוהה, היתרון בהם לעומת חקלאות קונבנציונלית שבחקלאות הקונבנציונלית על הקרקע יש הרבה שלבים של עיבוד והתהליכים לא יעילים, ואילו האצות מתפתחות באופן וגטיבי, והיעילות הפוטוסינתטית והפיכת אנרגית שמש לבימוסה גבוהה מאד.

אחד הפרויקטים הרווחיים ביותר באילת, פרויקט הפירנלה - אצה שחיה במי מלח ויוצרת גליצרין, והמוצר הראשון היה לנצל את הגליצרין שמתפתח באצה, כמוצר תעשייתי ואפילו אנרגטי. יותר מאוחר פרופ' מרדכי עברון ז"ל ממכון ויצמן ועמי בן אמוץ מצאו שאצה זו מיצרת גם את פיגמנט הקרוטן והוא ידוע כאנטי קרצינוגן, ונמכר במחיר גבוה ביפן. לכן היפנים נכנסו לנושא זה.

הפרויקט האחרון בבימוסה שאנו עובדים עליו הוא שילוב עם בעיה סביבתית. ונציה שוכנת לחוף הלגונה של ונציה שמגדלת חסות ים בכמויות אדירות. אולבה נקטוקה - חסת ים - נרקבת בלגונה של ונציה, ולפעמים צריכים לפנות את בתי המלון בחזית של ונציה בגלל הסירחון. ישנה חברה איטלקית שמוציאה כ-150,000 טון אולבה מונציה ועובדים עבודה כדי לעשות פרמנטציה, תסיסה אנארובית ליצור ביו גז. שוב חומר כמו אשפה שגורם למפגע סביבתי קשה ומוצא כחומר פסולת ואנו תפקידנו להפוך אותו לאנרגיה או באמצעות שרפה ישירה או תסיסה אנארובית שיוצרת גז לשריפה.

למשל מפעל השפכים בחיפה - מבוסס על תסיסה אנארובית של ביצה ביולוגית, ויש שם מתקן המספק קרוב ל-2 מגוואט שאמור לייצר חשמל עבור צרכי המפעל. אילו היו מפעילים את המפעל נכון היו להם עודפי חשמל.

השקף האחרון - המשק הסגור. בארצות מתפתחות ובלתי מפותחות מדברים על משק חקלאי סגור, גם מבחינה אנרגטית כאשר כל החומר האורגני, כולל הפרשות אדם, הפרשות בעלי חיים, ופסולת צמחית הולכים לתסיסה אנארובית, כדי לחמם את התסיסה האנארובית מכניסים אנרגיה סולרית, אולי גם אנרגית רוח ואצות ומגדלים בסוף דגים וברווזים.

שאלה מהקהל: - השאלה בקשר למערכת ההירוליזה להפקת אתנול. איך התקדם המתקן. שאלה שניה לד"ר יניר - יש לכם המרכיבים הבסיסיים למערכות משולבות, מערכת קירור, מערכת סולרית, איך חברת פז רואה בעתיד מערכות משולבות כטכנולוגיה ליצוא או לפיתוח בישראל.

פרופ' גדליה שלף - המערכת של ייצור אתנול מאשפה אחרי שלוש שנות מחקר הגיע לשלב הדגמה למעשה עברנו את שלב מתקן הפילוט, חברת פז החליטה ללכת על הפרויקט אם תמצא משקיע כדי להתחלק בהשקעות הדרושות לנושא.

דר' איתן יניר - היו שתי אפשרויות, או להקים מתקן הדגמה של 50 טון ליום אשפה במפעל האשפה של נעמן, או בארה"ב. היות והשוק הגדול לטיפול באשפה הוא בארה"ב החלטנו להקים את המתקן הראשון שם ומחפשים משקיע. ההשקעה היא כ-5 מליון דולר.

לגבי המערכות המשולבות, היו מגעים פה ושם אבל הנושא עדיין אינו כלכלי, זו השקעה גדולה. אין לנו בתכנון כרגע פרויקט משולב.

פרופ' גדליה שלף: - קשה להחדיר טכנולוגיות חדשות. הן נחשבות עדיין לסיכון גבוה. הטכנולוגיות עליהן מדברים תלויות בשני דברים, הבעיה הסביבתית, ריבוי הרשויות. משרד האנרגיה אומר שזו בעיה סביבתית, משרד הפנים אומר שזו בעיה חקלאית. אם מחירי האנרגיה היו כמו שחשבנו עם משבר המפרץ הרי אנו בדרך המלך מבחינה כלכלית. אם התנודות במחירי האנרגיה - למשל עירית חיפה זורקת את האשפה במזבלה שמסכנת את שדה התעופה בחיפה בגלל הצפורים שיכולות להכנס למנועים. לעירית חיפה זה זול. גם לא מפריע לה שיש קניון חדש ליד המזבלה. פתרון נכון צריך לעלות לעיריה במקום 3 דולר לטון 20 דולר.

פרופ' גד חצרוני - אני רוצה לסיים את הדיון בהצעה למוסד נאמן לקיים יום עיון על סילוק פסולת גולמית, שהיא אחת הבעיות המעניינות והחשובות. משרפה ועשן הם בעיות קשות.

דברי סיום

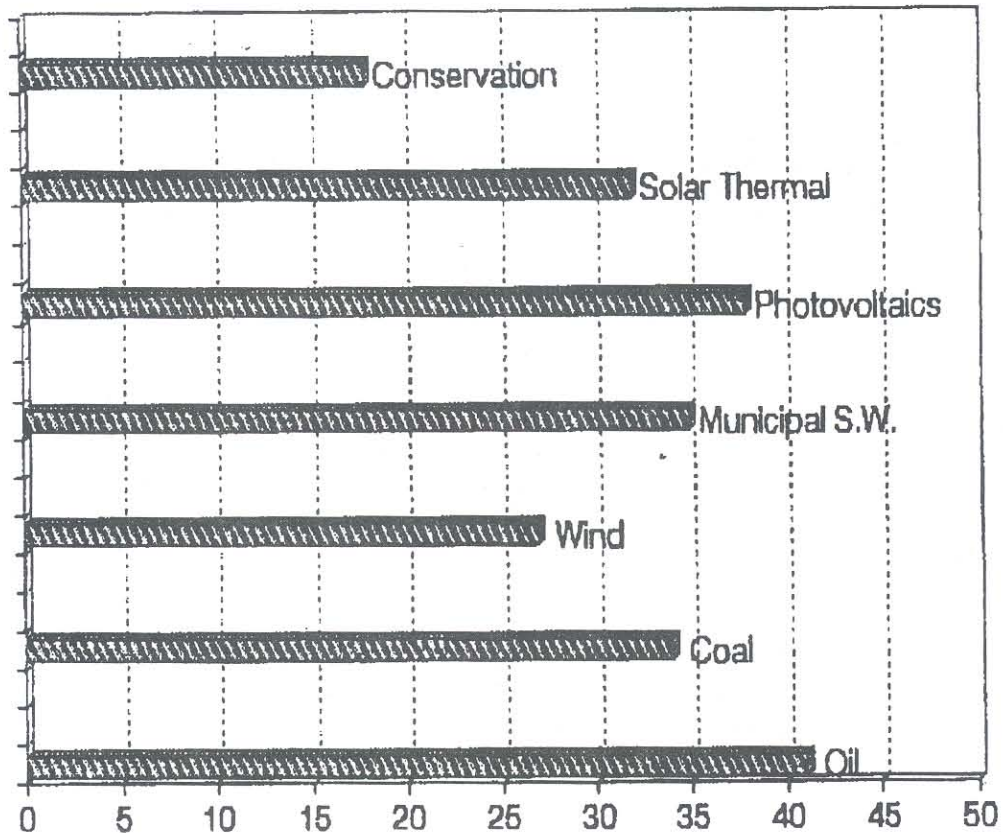
ד"ר אברהם ארביב משרד האנרגיה והתשתית

שר האנרגיה מתנצל שלא יכול היה להופיע. הנושא של אנרגיות חלופיות קרוב ללבו. הוא מאד גאה בהשגות חברות לוז ואורמת שיש להם נתח גדול בשוק העולמי של אנרגיות חלופיות.

בענין האתגרים הוא אינו רואה בעתיד הקרוב אפשרות לבנות כור גרעיני מיובא ממקום כלשהו בעולם, כך שהדרך היחידה היא ללכת על פתרון ישראלי לאנרגיה חלופית לטווח הארוך יותר. הנושא עדיין על הפרק. עדיין נושא לויכוח.

תעלת הימים נמצאת בבחינה מחודשת וכנראה נתחיל פרויקט משולב עם מפעלי ים המלח. מפרויקט תעלת הימים עשויים לנבוע גם פרויקטים אחרים, כגון חקלאות ימית ביחוד לאור העליה הגדולה. יש לנצל את הכוח המדעי המגיע אלינו בפרויקט גדול כמו תעלת הימים ולנסות ולמצוא דרך שהפרויקט יוכיח את עצמו מעבר לזה.

בנוגע לניצול פצלי שמן זה השג גדול. הוא נבדק על ידי ועדה במשרד לראות אם יש הצדקה בנסיבות החדשות ללכת להפקת נפט מפצלי שמן. הדבר לא נראה כרגע ישים, אבל בנושא הפקת החשמל הכוונה להגיע עד שנת 2005 ש-10% מהחשמל המיוצר בארץ מפצלי שמן. עד כאן דברי שר האנרגיה.



מה שצריך לעשות לאור מה שנסקר היום הוא להגיע לתקינות העלות האמיתית של הנפט. לכמת את ההשוואות על ידי כימות החוצאות השליליות או כימות העלות הנוספת בהשקעות על ידי מניעת זיהום אויר וכו'. יש בעולם מספר מרכזים שמתחילים לעסוק בנושאים אלה. אילו העולם היה מבוסס על אנרגיות חלופיות לא היה צורך במלחמת המפרץ ובהגנה על שדות הנפט. בקליפורניה המציאו כלי חישובי כדי להשוות את ההשקעות למקורות האנרגיה על בסיס העלות האמיתית כאשר נבדקת לא רק ההשקעות אלא הכלכליות הנקיה שלהם, השפעות על כח אדם מקומי ואסטרטגיות שונות. נסיתי ליישם את השיטה לארץ. כמה שהמספר גבוה יותר העלות של המשאב יותר זולה, בתנאים של ישראל. את הפער בין נפט לשימור אנרגיה אי אפשר לחסות. זה חומר למחשבה כדי לקבל החלטות על סמך דברים מבוססים ולא תחושות.