

ניתוח חלופות לחימום מערכת מסוחרת גידול דגים

בחג"מ עין יהב

מוגש למו"פ נגב – ערבה

על ידי נעם מוזס ואריק אשכנזי

המרכז הלאומי לחקלאות ימית , אילת

ספטמבר 2000

משתתפים:

- רן שגב – מנהל חג"מ עין יהב
- אורי דרורי – חברת גידי תנורים
- דוד פונימן – חברת פימאת

תוכן

סיכום והמלצות

1. מבוא
2. הגדרת תנאי סביבתיים, נתוני תיפעול
3. ספציפיקציות לתיכנון
4. סקירת שיטות החימום
5. השוואת עלויות של שיטות החימום
6. רשימת ספרות ומקורות מידע

סיכום והמלצות

נבחנו חלופות לחימום מים בבריכות דגים, על פי נתוני החג"מ בעין יהב, בשתי גישות. בגישה ראשונה המחשבת מדדי עלות של כל חלופת חימום עצמאית נמצא שהחלופות המתבססות על מים גיאותרמיים הן זולות במיוחד. הסיבה לכך היא שהמים הגיאותרמיים מספקים אנרגיה בעלות נמוכה מאוד.

במחיר מים של 22.5 סנט/מ"ק ובהספקה ישירה של המים הגיאותרמיים לבריכות, עלות הקוט"ש היא כ 2 סנט (לעומת 8 סנט קוט"ש חשמלי). בחלופה של החלפת חום עלות הקוט"ש היא אפסית (0.7 סנט/קוט"ש, שהיא בעיקר עלות השאיבה). חלופה נוספת המיצרת חום בעלות נמוכה היא חימום סולארי המייצר קוט"ש ב 1.77 סנט, בתנאים שהוגדרו, אך איננה מסוגלת לספק את האנרגיה הדרושה בשעות ללא קרינה (חימום לא קבוע בשעות היממה ובעונות השנה).

סדר העדפת החלופות לפי מדד העלות הכולל הוא :

חלופה: שיטה:	ב' >> גיאותרמי החלפת חום	ו' > סולארי	א' > גיאותרמי ישיר	ד' > משאבת חום	ז' > גנרטור תעו"ז	ג' > תנור סולר	ה' > גוף חימום
עלות קוט"ש (סנט/קוט"ש)	0.7	1.8	2.0	3.3	4.8	6.1	9.0

מדדי העלות נותנים תמונה תיאורטית ללא התחשבות בשילוב בין מערכות לשמירה על טמפרטורה קבועה ובמשך ההפעלה לאורך הזמן. על מנת להעריך את השיטה העדיפה בתנאי החג"מ נבדקה גישה שניה המחשבת את העלויות השנתיות של השיטות השונות, כולל מערכת גיבוי. נמצא כי החלופות המתבססות על המים הגיאותרמיים עדיפות על פני השיטות האחרות. לאחר מכן, באות השיטות המתבססות על משאבת חום כמתקן חימום ראשי או כגיבוי לחימום סולארי או לגנרטור המופעל בשעות שיא ופסגה בתעריף תעו"ז.

סדר העדפת החלופות לפי העלות השנתית הוא :

חלופה: שיטה:	ב' >> גיאותרמי החלפת חום	א' > גיאותרמי ישיר	ד' = משאבת חום	ו' = סולארי+ מש.חום	ז' > גנרטור+ מש.חום	ג' > תנור סולר	ה' > גוף חימום
עלות שנתית (דולר/שנה)	כ 2,200	כ 6,400	כ 11,000 עד 12,600	כ 20,600	כ 29,100	כ 20,600	כ 29,100

יישום המסקנות על בחירת מערכת לחג"מ

בחלופה א' הספקה ישירה של מים גיאותרמיים, כרוכה בספיקות גבוהות לעומת לספיקות הקיימות בבריכות (150 לעומת 6 מ"ק/יום, או כ 50% תחלופה מנפח הבריכות ביממה לעומת כ 2% ליממה, בהתאמה). אפשרות זו נפסלת עקב מגבלות בסילוק מים ונוכחות כלור במי הכניסה. במידה ובעיות אלו לא היו קיימות, עדיין מדובר בכמויות מים רבות יחסית לשימוש במערכות מסוחררות. במקרה זה, תדרש תפוקה של כ 150 ק"ג דגים/מ"ק/שנה (או צפיפות של כ 100 ק"ג/מ"ק) על מנת לייצר ק"ג דג בצריכת מים של מ"ק אחד.

החלופות ד', ו', ז' של משאבות החום כרוכות בהשקעה גבוהה של כ 26,000 עד 50,000 דולר. עלות הטיפול השנתי בחלופות אלו (אנרגיה + תחזוקה) נעה בין 4,500 ל 7,000 דולר בשנה. החלופות ג', ה' של תנור סולר וגוף חימום הן היקרות ביותר. חלופות אלו אמנם כרוכות יחסית בהשקעות לא גבוהות (10,000 עד 12,500 דולר) אך לעומת זאת מחייבות הוצאות אנרגיה גבוהות מאוד (18,500 עד 26,500 דולר בשנה).

המלצות

1. מערכת החימום המומלצת לחג"מ היא שימוש במים גיאותרמיים בהחלפת חום. שימוש זה מותנה בהסדר עם ספק המים, חברת מקורות לגבי רציפות ההספקה.
2. השימוש במים גיאותרמיים בהספקה ישירה לבריכות איננו מעשי בתנאי החג"מ.
3. במידה ושימוש בהחלפת חום של המים הגיאותרמיים אינו אפשרי, מומלץ להשתמש באחת משיטות של משאבות החום, בהתאם לשיקולי השקעה מול עלות שוטפת.
4. ניתן להמליץ על שיטת החימום הרצויה על פי תרחישים שונים המתייחסים לצורך שמירה על טמפרטורה אחידה וכן כתלות במחיר המים הגיאותרמיים:

תרחיש	מים גיאותרמיים במחיר נמוך	מים גיאותרמיים במחיר גבוה	קריטריון
נדרשת טמפרטורת מים אחידה (מקרה חג"מ)	גיאותרמי בהחלפת חום (20 סנט/מ"ק < מחיר מים)	משאבות חום (20 סנט/מ"ק > מחיר מים)	עלות שנתית
לא נדרשת טמפרטורת מים אחידה (מקרה כללי)	גיאותרמי בהחלפת חום (8 סנט/מ"ק < מחיר מים)	חימום סולארי (8 סנט/מ"ק > מחיר מים)	מדד עלות כולל

המלצות כלליות

5. המים הגיאותרמיים מציעים אנרגיה חומנית במחיר נמוך מאוד. יש לפתח כיוון יסודי זה באיזור נגב ערבה, תוך תיאום ושיתוף גורמים שיעשו שימוש במים אלו לאחר השימוש בחוות דגים.
6. השימוש בקולטי שמש נראה מעניין, לאור ניתוח זה. יחד עם זאת, נדרשת עבודה נוספת על מנת להעריך את השינויים הדינמיים בטמפרטורת המים כתוצאה משימוש בקולטי שמש ללא מערכת גיבוי וכן נדרשת עבודת אופטימיזציה להתאמה לשימוש בבריכות דגים.
7. העבודה הנוכחית בחנה חלופות שונות לחימום והשוותה בניהם. אין בעבודה זו התייחסות לכדאיות החימום ביחס לתרומה לגידול דגים ולשיפור כושר הייצור. גם בנושא זה נדרשת עבודת מחקר נוספת.

1. מבוא

ירידת טמפרטורת מים בחורף במערכות גידול דגים גורמת להתארכות תקופת הגידול ולפיכך להקטנת היעילות הכלכלית של מערכות אלו. בארץ מוכרת התופעה בגידול בבריכות, הגורמת לעצירת הגידול למספר חודשים במהלך החורף, ובמקרים מסוימים אף לתמותות דגים (בעיקר אמנונים). השיטה המקובלת להתמודדות עם בעיה זו במשקים במרכז וצפון הארץ היא הכנסת הדגים לבריכות עם חממות לתקופה של "שמירת חורף". בתקופה זו לא מתקבלת גדילה של הדגים עקב טמפרטורות נמוכות, אך גם נמנעות תמותות דגים.

במחקר שבוצע על ידי המרכז הלאומי לחקלאות ימית באילת (מלח"י), בשיתוף עם הטכניון ותחנת גינוסר, נבדקו כיסויי חממות שונים ונעשתה בדיקה ראשונית לחימום מי בריכות לגידול אמנונים בתקופת החורף. בתחנת המחקר בגינוסר הוקמה מערכת חימום הכוללת תנור סולר וצנרת סיחרור מים חמים דרך מחליף חום שהותקן בתוך הבריכה. בריכות הניסוי היו בנפח של 50 מ"ק, מחופות ביריעות רב-חוזק שקוף. סך איבודי החום חושבו על ידי מדידת ספיקת הסולר וחישבו הערך האנגרטי. בחורפים 97-98 ו 98-99 חוממו הבריכות לטמפרטורה של 26°C . איבוד החום מפני הבריכה בטמפרטורה זו היה 240 ו 135 w/m^2 , בהתאמה (חורף 97-98 היה קר במיוחד). איבוד חום נוסף נגרם עקב תחלופת מים קרים (מי כינרת של 16°C), שנע בין 150 ל 93 w/m^2 , בתחלופות של 30% עד 20% ביממה, בהתאמה. בוצע אומדן ראשוני לבחינת כדאיות השימוש בחימום. אומדן זה הראה כי עלות החימום ל 4-5 חודשי החורף בתנאי גינוסר היא 150-200 ש"ח/מ"ר (בתחלופת מים של 30% ביממה). בתנאי גידול אמנונים המקובלים בגינוסר לא נראה כי עלות זו כדאית.

תופעת ירידת טמפרטורה ועצירת גידול בחורף מתרחשת גם במתקני הגידול בתחנת המחקר בעין יהב (חג"מ). מעבר לבעיה הממשקית, תופעה זו מביאה להקטנת היקף הפעילות המחקרית בחג"מ. באיזור נגב ערבה קימים מקורות מים גאותרמים וכן האיזור מבורך בקרינות שמש גבוהות ובחורף חם ונוח יחסית. לפיכך יש מקום לבדוק חלופות שונות לחימום מים המתאימות לאיזורים אלו.

מטרות העבודה

- (1) המלצה על מערך חימום במתקני תחנת הניסיונות בחג"מ – עין יהב.
- (2) התייחסות לחלופות לחימום בריכות במערכת מסוחררת בתנאי נגב - ערבה.

העבודה תתמקד בנתונים ואילוצים מקומיים של עין יהב בלבד, אך יעשה מאמץ להקיש על איזור הנגב בכלל, במסגרת ההיקף המצומצם של עבודה זו.

יש להדגיש שבדיקה זו לא מלמדת על כדאיות החימום ביחס להגדלת תפוקות דגים, אלא על איזו חלופה זולה יותר ובאיזו מגבלות.

2. הגדרת תנאים סביבתיים ונתוני תפעול

2.1 תיאור אקלימי

הערבה היא האזור החם ביותר בישראל. על פי נתוני השירות המטאורולוגי טמפרטורת המקסימום היומית הממוצעת באיזור ספיר בחודשים יולי אוגוסט היא 38.5°C ועשויה להגיע ל 40°C עד 45°C בימים מסוימים. ההתקררות בשעות הלילה בקיץ גדולה עם משרע יומי של 14°C - 14.5 . אקלים החורף באיזור ספיר הוא נוח יחסי, טמפרטורת המקסימום היומית הממוצעת בחודשי החורף היא 19.5 - 21°C וטמפרטורת המינימום הממוצעת הימית היא 8.5 - 10°C . בימים מסוימים יכולה טמפרטורת המינימום בחורף לרדת מתחת ל 5°C . הלחות היחסית נמוכה ומגיעה בצהרי היום בקיץ ל 25 - 30% ובחורף ל 40 - 50% . כמות המשקעים השנתית הממוצעת באיזור ספיר היא 42 מ"מ. נתונים אלו מבוססים על מדידות בתחנה מטאורולוגית ספיר. עין יהב נמצאת כ 7 ק"מ מצפון מזרח לתחנת ספיר, ברום של 80 מ'. בטבלה 1 מוצגים ממוצעים אקלימיים רלוונטים להמשך העבודה.

טבלה 1 : נתונים אקלימיים

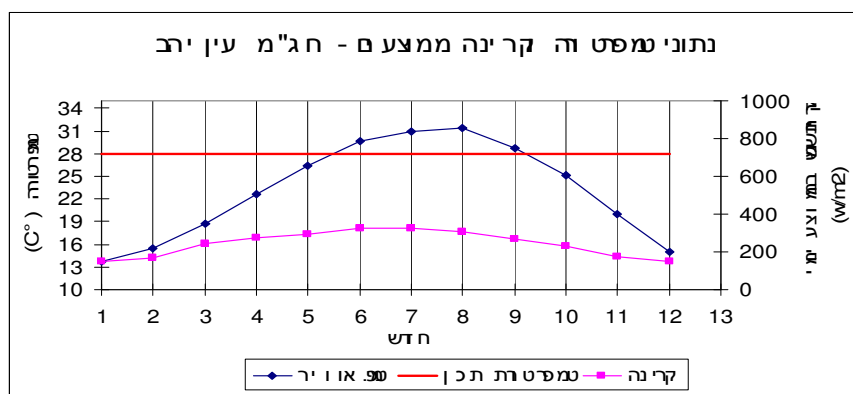
משתנה/חודש	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
טמפרטורת אוויר ^{1} ($^{\circ}\text{C}$)	13.8	15.4	18.7	22.6	26.4	29.7	31.0	31.4	28.8	25.2	20.0	15.0
הפרש טמפרטורה יום לילה ^{1} ($^{\circ}\text{C}$)	11.0	11.1	12.2	13.6	14.2	14.8	14.5	13.9	12.3	11.8	11.5	10.5
קרינה גלובלית ^{2} (קק"ל/מ"ר/יום) (וואט/מ"ר) ^{3}	3060	3540	5060	5680	6010	6700	6730	6260	5540	4750	3650	3030
	148	172	245	275	291	325	326	304	269	230	177	147

ממוצע שנתי	ממוצע	סטית תקן
טמפרטורת אוויר ^{1} ($^{\circ}\text{C}$)	23.17	6.5
הפרש טמפרטורה יום לילה ^{1} ($^{\circ}\text{C}$)	12.62	1.5
קרינה גלובלית ^{2} (קק"ל/מ"ר/יום) (וואט/מ"ר) ^{3}	5000	1379
	242	67

1 - נתוני תחנה מטאורולוגית ספיר
 2 - נתוני תחנה מטאורולוגית אילת
 3 - הספק קרינה גלובלית מחושב בממוצע לכל שעות היממה

איור 1 מציג חתך טמפרטורת אוויר ממוצעת. על סמך טמפרטורת התכן לחימום בריכות של 28°C ניתן לראות כי טמפרטורת האוויר הממוצע נמוכה מטמפרטורת התכן במשך כ 8 חודשים בשנה.

איור 1 : חתך טמפרטורה וקרינה שנתי



2.2 מערכות הגידול בחג"מ

באתר קימים שלוש חממות שונות. בחממה א' 4 בריכות ביטון המשמשות ללימוד מיחזור מים בגידול אינטנסיבי. בחממת מיכלים קימים 16 מיכלים של 5.5 מ"ק ו 16 מיכלים של 0.5 מ"ק. בנוסף, קיימת חממה קטנה נוספת המהווה המשך לחממת המיכלים ובה לא מותקנים כיום מיכלים. חממה שלישית שימשה לניסויי הידרופוניקה ובה מיכלים בנפח 35 מ"ק. טבלה 2 מרכזת את נתוני מערכות הגידול בחג"מ.

טבלה 2 : ריכוז נתוני מערכות גידול

חממה	מס. מיכלים/ב ריכות	נפח מיכל (מ"ק)	נפח כולל (מ"ק)	שטח פני מים כולל (מ"ר)*	סוג חממה	הערות
חממת בריכות	4	80	320	360	פוליאאתילן שקוף	בריכות גידול, מע. מסוחררות
חממת מיכלים	16	5.5	88	112	פוליאאתילן פנימי	מיכלי ניסוי
	16	0.5	8	8	ורב חוזק שקוף	
חממת הידרופוניקה	4	35	140	154	פלריג ירוק, חלונות פוליאאתילן	2) מיכלים קימים ו 2 בתיכנון
סה"כ	40		556	634		

2.3 מערכות הספקת המים קימות

קימים שני מקורות מים באתר : מי קו עין יהב, ומים חמים (גיאותרמים).

מי קו עין יהב: מים אלו משמשים כמי שתיה ליישוב עין יהב. החג"מ מוזן בקו 4" במים בלחץ של 3.5 בר. טמפרטורת המים נעה בין 23-24°C בחורף ל 24-25°C בקיץ.

מחיר המים בצריכה של עד 50,000 מ"ק בשנה (שווה ערך ל 137 מ"ק/יום) הוא 0.9 ש"ח/מ"ק. כל כמות מים נוספת מחויבת במחיר של 1.5 ש"ח/מ"ק. החג"מ נמצא ברמת צריכה גבולית של כ 55,000 מ"ק בשנה. בעבודה זו נתעלם מצריכת היתר ונניח מחיר מים של 0.9 ש"ח/מ"ק.

מים חמים: המים החמים מגיעים מבאר "עין יהב 6" הנמצאת במרחק של 6 ק"מ צפונה בערבה. המים החמים מוזרמים למתקן טיפול ובריכת אגירה של מים להשקית שטחי עין יהב, הנמצא בקרבת החג"מ, כ 150 מ' ממערב לחממות. מתקן הטיפול כולל סינון ושאיבה של המים לבריכת האגירה וכן צומת מיהול של מי קו המשמשים כתוספת לבריכת האגירה.

החג"מ מוזן מקו 4" של מים חמים המסתעף מכניסת המים לבריכת האגירה. הלחץ בקו זה יחסית נמוך (כ 1-1.5 בר לפי הערכה). טמפרטורת המים החמים כ 38-40°C. המים החמים מכילים לעיתים כלור המוזן באיזור הבאר באופן לא רציף.

מחיר המים 0.9 ש"ח/מ"ק. יתכן וקיימת הנחה על צריכת מים חמים, אך בעבודה זו נניח מחיר ללא הנחה.

צמתי מיהול: בשטח קיימים מספר צמתי מיהול או אפשרויות לצמתי מיהול. בראש השטח (באיזור שער הכניסה נמצאים שני צינורות ההספקה (מי קו ומים חמים) בצמוד אחד לשני. מנקודה זו קיים קו 4" לכיוון בריכת האגירה שאיננו בשימוש. בצד הדרומי של חממת הבריכות קימת נקודה נוספת עם אפשרות לצומת מיהול. בקרבת חממת המיכלים וכן בקרבת חממת ההידרופוניקה קימות צמתי מיהול שאינן בשימוש.

2.4 ספיקות מים למתקני הגידול

על פי נתוני החג"מ, להלן אומדן ספיקות מים למתקנים השונים. סה"כ צריכת מים היא כ-150-160 מ"ק/יום.

טבלה 3 : נתוני ספיקות מים

חממה	תחלופה (ימים)	ספיקה (מק"י)	מקור מים	יציאת מים	הערות
חממת בריכות	2%	6	קרים\ חמים	לבריכת טיפול כנעני	שימוש בקוצב ידני לפיצוי נפח
חממת מיכלים	כ 150%	150	קרים	לבור שאיבה והספקה לחממת ההידרופוניקה	זרימה רציפה, בעתיד מיחזור
חממת ההידרופוניקה		150	חממת מיכלים	לואדי	זרימה רציפה בעתיד מיחזור

2.5 עונתיות צריכת מים

צריכת המים לאורך השנה קבועה יחסית. יש לציין כי בתקופת הקיץ לא ידרש חימום (אלא במקרים מסוימים אף קירור) ולכן לא תהיה צריכה של מים גיאותרמים בעונת הקיץ.

2.6 אילוצי הוצאת מים

הוצאת מים ממתקני החווה וממתקני החג"מ היא בעייתית. בעבר מים אלו הועברו למאגר תיפעולי ומשם נשאבו להשקיית שטחים חקלאיים. הובלת המים נעשתה בקו, אשר בצידו השני (במעלה הזרם) מספק מי שתיה ליישוב עין יהב. על פי הוראות של משרד הבריאות, לא ניתן להשתמש בקו זה להובלת מי הקולחים של גידול דגים מחשש לזיהום מי השתיה, וזאת למרות שכיוון הזרימה הוא בכיוון השדות החקלאיים. משרד הבריאות מחייב ניתוק אוויר ולפיכך לא ניתן להוציא מי הקולחים במערך הצנרת להשקית השטחים החקלאיים.

כמות מים מועטה (מ"ק בודדים ביום) מוזרמים לבריכות טיפול של כנעני המוביל את המים היוצאים מהחווה (כ 1000 מ"ק/יום) לאיזור חקלאי אחר (ולא בקו הנ"ל). רוב המים היוצאים מהחג"מ נשפכים לוואדי. בעתיד יש כוונה להימנע מהוצאת מים בדרך זו, דבר שיחייב הקטנת צריכת המים הטריים והוספת מערכות מיחזור לכל המערכות בחג"מ.

2.7 הספקת חשמל וגנרטור

מחיר חשמל בתעריף רגיל שנלקח בעבודה זו הוא 0.08 דולר/קו"ש. תעריף תע"ז מפורט בהמשך. הספק כולל בחג"מ הוא כ 15 KVA. קיים גנרטור קטרפילר בהספק 30 KVA המותקן בסמוך לחממת הבריכות וחממת המיכלים.

2.8 הערכת איבודי חום על סמך נתוני טמפרטורה מדודים

על מנת לבסס את אומדן איבוד החום הצפוי ניתן לנתח נתונים קיימים של טמפרטורת מים ונתוני תיפעול של המערכות בחג"מ. לצורך זה נדרש בסיס נתונים הכולל: טמפרטורת מים ממוצעת (בממוצע שעתי או יומי) וספיקת מים לבריכה בעלת שטח פנים ידוע. מתוך נתונים אלו ניתן להעריך את איבוד החום מהבריכה. בנוסף, ניתן להפעיל מודל מאזן חום על התנאים האופייניים בחג"מ ולקבל אומדן מחושב תיאורטי לאיבוד החום הצפוי.

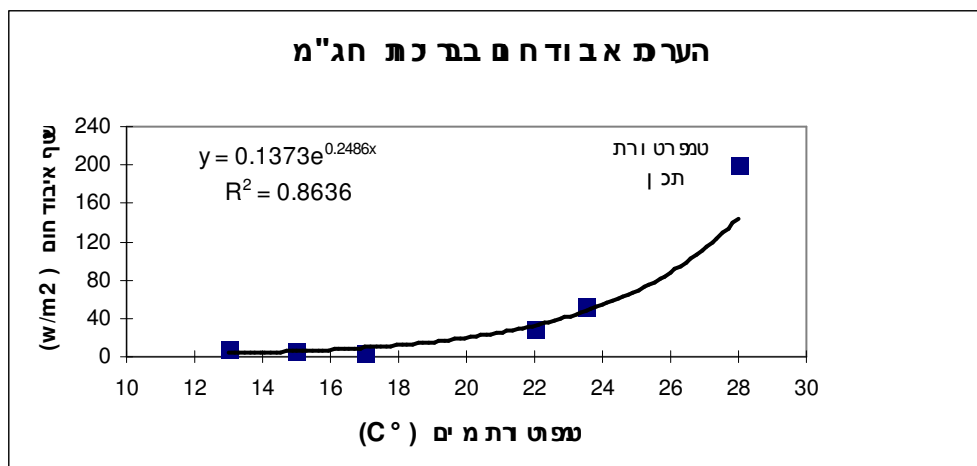
במקרה הנוכחי לא היו בידינו בסיס נתונים מספק ומפורט לביצוע הערכת אומדן איבודי החום. למרות זאת, מתוך הערכה בעל פה של טמפרטורות מים וספיקות אשר נמסרו על ידי רן שגב, ניתן לבצע הערכה "גסה" לאיבוד החום. על סמך הפרש בין טמפרטורת מי כניסה לטמפרטורת הבריכה ניתן לחשב את כמות האנרגיה המסופקת לבריכה על ידי המים (טבלה 4).

טבלה 4: נתוני טמפרטורת בריכות מקורבים - לתקופת החורף

חישוב הספקת חום על ידי מים -מצב קיים						
בריכה 1	בריכה 2	בריכה 3	בריכה - כנעני	מכל מנהרה 1	מכל מנהרה 2	
17	15	13	22	17	23.5	טמפ. בריכה (°C)
24	24	24	24	24	24	טמפ. מקור (°C)
7	9	11	2	7	0.5	הפרש טמפ. (°C)
1.5	1.5	1.5	30	0.10	15	ספיקת מקור מק"י
10,500	13,500	16,500	60,000	700	7,500	כמות אנרגיה מסופקת במים קקל/יום
0.51	0.65	0.80	2.91	0.03	0.36	הספק מסופק ע"י מים קו"ט
5	7	8	29	4.8	52.0	הספק מסופק ע"י מים w/m2
שטח פני מים של בריכה = 100 מ"ר			שטח פני מים מנהרה = 7 מ"ר			

הספק החום המסופק על ידי המים הוא אקוולנטי במקרה זה לשטף איבוד החום מפני הבריכה. קיימת מגמה של עלית איבוד החום כתלות בטמפרטורת הבריכה או המיכל (איור 2). באמצעות אקסטרפולציה בין הנתונים הנ"ל לטמפרטורת התכן ניתן לראות כי הערכה של איבוד חום של 200 w/m^2 בטמפרטורה של 28°C הינה סבירה.

איור 2: אקסטרפולציה להערכת איבוד חום



3. ספציפיקציות לתכנון

ביצוע מערכת חימום בחג"מ יבוצע בשלבים. בשלב ראשון תוקם מערכת לחממת הבריכות ובהמשך לשאר חממות החג"מ. על מנת לפשט את השוואת החלופות, הוגדרה חממת הבריכות כ test case ועבורה תבוצע השוואה של חלופות חימום שונות. טמפרטורת התכן נקבעה ל 28°C . אומדן איבוד החום בטמפרטורה זו הוא 200 w/m^2 . זאת על סמך תוצאות ניסויים קודמים בגינוסר ועל סמך ניתוח מאזן החום. להלן ספציפיקציות לתכנון:

טבלה 5: ספציפיקציות לתיכנון מערכת חימום

ספציפיקציות לתיכנון - חממת בריכות			
נתוני בריכות (מצב קיים)			
מס. בריכות	4		
שטח בריכות	360 מ"ר		
נפח מים בבריכות	320 מ"ק		
תוספת מים טריים (לכל הבריכות)	6 מ"ק/יום		
טמפ. מי כניסה (קו עין ירב)	24 $^{\circ}\text{C}$		
טמפ. מי בריכה - תכן	28 $^{\circ}\text{C}$		
נתוני איבוד חום			
איבוד חום מירבי למ"ר	200 וואט/מ"ר		
איבוד חום מירבי לכל הבריכות	61862 קק"ל/ש		
איבוד חום מירבי לכל הבריכות	72 קו"ט		
איבוד חום בתחלופת מים	1000 קק"ל/ש		
תקופת חימום			
חודשי חימום - ברוטו	אוקטובר - מאי		
	8		
אוקטובר	50% ב % מהחודש		
נובמבר	75% ב % מהחודש		
דצמבר	100% ב % מהחודש		
ינואר	100% ב % מהחודש		
פברואר	100% ב % מהחודש		
מרץ	85% ב % מהחודש		
אפריל	70% ב % מהחודש		
מאי	50% ב % מהחודש		
שעות חימום בשנה	4604 שעות		
שיעור תקופת חימום בשנה	53% ב % משנה		
כמות אנרגיה נדרשת			
קוט"ש/שנה	331,517		
קק"ל/שנה	5.0E+09		
נתוני מחירי אנרגיה			
מחיר סולר	0.375 דולר/ליטר		
מחיר חשמל פסגה - מקורב	0.16 דולר/קוט"ש		
מחיר חשמל גבע - מקורב	0.09 דולר/קוט"ש		
מחיר חשמל שפל - מקורב	0.04 דולר/קוט"ש		
מחיר חשמל - תעריף רגיל	0.08 דולר/קוט"ש		
מחיר מים חמים	0.225 דולר/מ"ק		

מספר שעות החימום 4604 בשנה חושבו כשעות עבודה בהספק חימום מלא של 72 קו"ט, על פני כל החודשים, בהתאם לפירוט בכל חודש.

4. סקירת שיטות החימום

- בעבודה זו נבחנו החלופות הבאות לחימום מים :
- א - מים גיאותרמים בהספקה ישירה
 - ב - מים גיאותרמים בהחלפת חום
 - ג - תנור סולר
 - ד - משאבות חום
 - ה - גופי חימום חשמליים
 - ו - חימום סולרי בעזרת קולטי שמש
 - ז - שילוב גנרטור בתעריף תעו"ז

בסעיפים שלהלן יתוארו מאפיינים עקרוניים של כל חלופה, אופן חישוב הפרמטרים המרכזיים וכן אומדן עלות השקעה, תיפעול, תחזוקה ואורך חיים של כל חלופה, עבור תנאי החג"מ. אומדנים אלו ניתנו על ידי שתי חברות מקצועיות בתחום של מערכות חימום : גידי תנורים וחברת פימאת (פיתוח מקורות אנרגיה חליפיים בע"מ).

4.1 חלופה א' - מים גיאותרמים – הזרמה ישירה

בחג"מ, כמו באתרים אחרים ברחבי נגב – ערבה, קיימים מים חמים - גיאותרמים שניתן להשתמש בהם כמקור אנרגיה לחימום הבריכות (בהזרמה ישירה או בהחלפת חום). ישנם מספר מגבלות שיש לתת עליהם את הדעת : התקשרות עם מקורות שאינם יכולים להתחייב בהספקה קבועה ורצופה של המים, פינוי מי היציאה לגורם חיצוני או לסביבה, ריכוז הכלור במים מגיע ל-0.5 ppm.

כמות החום המסופקת על ידי מים חמים בהזרמה ישירה מחושבת לפי הפרש הטמפרטורה בין המים החמים ומי הבריכה, כפול ספיקת המים :

$$q = (T_{in} - T_{pond}) C_p * Q$$

כאשר q = שטף חום נדרש (קק"ל/שעה)

T_{in} = טמפרטורת מים חמים בכניסה לבריכה ($^{\circ}\text{C}$)

T_{pond} = טמפרטורת מים בבריכה – תכן ($^{\circ}\text{C}$)

C_p = קיבול חום של המים (J/kg K)

Q = ספיקת מים נדרשת (ליטר/שניה)

בהנחה שטמפרטורת מים חמים היא 38°C וטמפרטורת הבריכה היא 28°C , וכמות החום הנדרשת היא 63,000 קקלש (72 קו"ט), תידרש ספיקת מים של 6.2 מק"ש או 148 מ"ק/יום.

יתרונות : חימום ישיר וזול של מי הבריכות, אין כל השקעה, פשטות בתיפעול.
חסרונות : יש צורך בטיהור המים מכלור, נדרשות כמויות מים גבוהות מהנדרש למע. מסוחררת.
עלות תפעול : מחיר מים 0.225 דולר/מ"ק
בהפרש טמפרטורה ל 10 מעלות מתקבלת אנרגיה של 11.6 קוט"ש למ"ק, במחיר נמוך במיוחד של 1.2 סנט לקוט"ש.

4.2 חלופה ב' - מים גאותרמיים - החלפת חום

דרך אחרת להשתמש במים הגיאותרמיים היא באמצעות מחליף חום שדרכו מוזרמים המים החמים בטמפרטורה גבוהה ויוצאים בטמפרטורה נמוכה, ומוחזרים ללא צריכה של מים כלשהי. בקרבת החג"מ נמצא מאגר תיפעולי של המים החמים המתופעל על ידי מקורות. בבדיקה שנערכה עם אנשי מקורות (מהנדס יוסי שמעיה) התברר שניתן לשנות את אופיין הספיקות במאגר, כך שכל המים הגאותרמיים ששימשו להחלפת חום יוכלו לחזור למאגר, בספיקות הנדרשות. אפשרות זו עשויה להיות ללא תשלום על המים, אך מותנה בהסדר עם חברת מקורות.

ספיקת המים הנדרשת תלויה בהפרש בין טמפרטורת כניסה ויציאה למחליף החום. על סמך משוואת חישוב מחליף החום ניתן לחשב את ספיקת המים החמים הנדרשת (נתוני המחליף ומשוואת החישוב יפורטו בהמשך). בהנחה שטמפרטורת הכניסה היא 38°C וטמפרטורת היציאה מהמחליף היא 32°C , תידרש ספיקת מים של 10.3 מ"ק"ש או 247 מ"ק"יום.

יתרונות : אפס צריכת מים נטו, השקעה נמוכה במחליף חום בלבד, פשטות בתיפעול, .
חסרונות : מגבלות ותלות בספק ומקבל המים החמים.
עלות תפעול : מחיר מים אפס (מותנה בהסדר עם מקורות)
בהפרש טמפרטורה ל 6°C מתקבלת אנרגיה של 7 קוט"ש למ"ק.

אומדן השקעה : 7,500 דולר בצינור להחזרת מים ומשאבה (הספק 1.5 קו"ט).
עלות תיפעול 0.63 סנט לשאיבת 1 מ"ק, תחזוקה שנתית 100 דולר לתחזוקת משאבה.

4.3 – חלופה ג' - תנור סולר

מערכת החימום הכוללת תנור הסקהבמים חמים בהספק של 100,000 קקל"ש, לשריפה של 10 ק"ג סולר בשעה. טמפרטורת המים בתנור הרצויה היא כ 50 מעלות. צריכת הסולר לתנור מחושבת לפי ערך כלורי של 8,600 קלוריות לליטר סולר (10 קוט"ש לליטר סולר) בניצולת של 70%. מחיר הסולר נלקח כ 1.5 ש"ח לליטר (0.375 דולר לליטר).

יתרון : אין צורך במערכת נוספת לחימום, מערכת אמינה.
אומדן השקעה בתנור סולר : 35,000 ש"ח (8,750 דולר), לא כולל מחליף חום.
עלות טיפול ותחזוקה שנתית : 3500 ש"ח (875 דולר)
אורך חיים : 10 שנים

4.4 - חלופה ד' - משאבות חום

משאבת חום הינה יחידה להספקת אנרגיה (לחימום ולקירור) המבוססת על החוק השני של התרמודינמיקה (עקרון פעולה זהה למזגן). תהליך החימום או הקירור מבוסס על מערכת סגורה של גז שבמרכזו מופעל מדחס הדוחס את הגז. בתהליך מעבר הגז לפזה הנוזלית ביחידת המעבה משתחרר חום ובאמצעות מחליף חום ניתן לחמם את מעגל החימום של הבריכה. הנוזל המוזרם ליחידת המאייד הופך לגז וקולט חום מהסביבה. חום זה מסופק על ידי אוויר הסביבה המוזרם על המאייד באמצעות מפוח. היחס בין האנרגיה המושקעת (בדחיסה) לבין אנרגיית החימום הוא כ 1 ל

4. ההספק של משאבת החום הנדרש לחימום הבריכות הוא 20 קו"ט המפיקים 80 קו"ט אנרגית חום.

יתרונות המערכת : אין צורך במערכת נוספת להשלמת הספק נדרש, אמינות גבוהה לאורך שנים. אומדן השקעה במשאבות חום : 90,000 ש"ח (22,500 דולר), לא כולל מחליף חום. עלות טיפול ותחזוקה שנתית : 1500 ש"ח (375 דולר) אורך חיים : 10 שנים

4.5 - חלופה ה' – גופי חימום חשמליים

חלופה זו לא נבחנה באופן מפורט ומשמשת כנקודת ייחוס לחלופות אחרות. באופן כללי שיטה זו יחסית יקרה בהוצאות חשמל, אך מצטיינת בפשטות הפעלה. בלאי גופי החימום עלול להיות גבוה.

הספק הנדרש לגופי החימום הוא 80 קו"ט באומדן השקעה 10,000 דולר. עלות תחזוקה 50 דולר בשנה, אורך חיים 5 שנים.

4.6 - חלופה ו' – חימום סולארי באמצעות קולטי שמש

צנרת פוליפרופילן (דגם הליוקול) בקוטר 6.4 מ"מ משמשת כקולטי שמש המונחים על האדמה ללא כיסוי. משאבה מסחררת מים במערכת סגורה בין קולטי השמש למחליפי החום הנמצאים בבריכה. טמפרטורת מי הסחרור בכניסה לבריכה מתכננת ל 32°C . קיימת אפשרות לסחרר את מי הבריכות דרך קולטי השמש ובכך לחסוך השקעה כוללת.

חישוב שטח פני הקולטים מתבסס על חישוב נצילות קולטי שמש המחושבת ע"י המשוואה הבאה :

$$\varepsilon = \{0.84 - (20 * (Ti - Ta) / G)\} * 0.8$$

כאשר Ti = טמפרטורת מים ממוצעת בקולט שמש

Ta = טמפרטורת סביבה

G = קרינה גלובלית (קק"לומ"רשעה)

0.84 = אחוז קרינה נקלטת בקולט החום

20 = מקדם הפסדי חום לסביבה (קק"לומ"רשעה\מעלה)

* סה"כ קרינה נקלטת = יעילות קליטת קרינה * קרינה יומית

* הספק לחימום של קולט שמש $[W/m^2] = \text{סה"כ קרינה נקלטת} \setminus \text{מס' שעות קרינה אפקטיבית}$

על פי משוואה זו מתקבל כי יעילות קליטת קרינת השמש הממוצעת לחודשי החימום (אוקטובר עד מאי) היא 50%. יעילות זו נעה בין 22% בחודש ינואר ל 75% בחודש מאי.

שטח הקולטים שנקבע במקרה זה זהה לשטח פני הבריכות ועומד על 360 מ"ר. ההספק המתקבל משטח הקולטים והיעילות הוא בממוצע 124 קו"ט, ונע בין 36 ל 235 קו"ט בחודשים ינואר ומאי, בהתאמה. יש להדגיש שמדובר בהספק בשעות הקרינה בלבד, ולא ממוצע על פני כל היממה.

נלקחו בחשבון 8 שעות קרינה ביממה. לפיכך מס. שעות העבודה של הקולט לחימום הבריכות הוא 1952 שעות בשנה (8 שעות X 244 ימים).

מערכת גיבוי תפעל 2022 שעות להשלמת הספקי החימום החסרים.

יתרון : מערכת פשוטה להפעלה, ללא תחזוקה ואורך שנים גבוה במיוחד.
חסרון : יש צורך במערכת חימום נוספת להשלמת ההספקים הנדרשים (מערכת גיבוי). נדרש שטח לפרישת קולטי שמש.
אומדן השקעה : 27,000 דולר ל 360 מ"ר קולטים (75 דולר/מ"ר קומפלט), כולל משאבת סיחור, לא כולל מערכת גיבוי ומחליף חום.
אומדן תחזוקה : 250 דולר לשנה, לשטיפת קולטים ותחזוקת משאבת סיחור.

4.7 – חלופה ז' גנרטור בתעריף תעו"ז

הגנרטור בחג"מ עין-יהב משמש כיום רק כגיבוי מערכת החשמל למקרה של הפסקת חשמל וגודלו 30KVA. הפעלת גנרטור בשעות שיא (פסגה וגבע) בתעריף תעו"ז מעלה את האפשרות לחימום מים ע"י אנרגיית חום עודפת מהגנרטור.

השיטה מבוססת על ניצול אנרגיה חשמלית עודפת וניצול חום הנפלט בעבודת הגנרטור משני מקורות חום : מי הקירור של הרדיאטור כאשר טמפרטורת העבודה של הגנרטור נעה בין 80 °C ל-90 °C וגזי הפליטה של המנוע הנפליטים בכ- 400 °C. במקביל לרדיאטור של הגנרטור מורכב מחליף חום צלעות אשר מסחרר בצד אחד את מי הקירור של הרדיאטור ובצד השני את מי מחליף החום (צנרת פלסטית) שממוקם בבריכה. בנוסף, מחובר מחליף חום גז-מים שמבצע החלפת חום בין גזי הפליטה של הגנרטור לבין מי מחליף החום שבבריכה.

הנחת התיכנון שגנרטור של 30 KVA מייצר חום בהספק של 30 קו"ט.

צריכת החשמל במו"פ עומדת על 20 KVA. כלומר, ניתן ב- 10 KVA הנותרים להפעיל מערכת חימום חשמלית נוספת להשלמת ההספק לחימום הנדרש לבריכות. ולכן, בחישוב תפוקת החום נלקח בחשבון 30 KVA של עודפי החום, ועוד 10 KVA להפעלת מתקן חימום בחשמל המיוצר מהגנרטור. הספק (ריאקטיבי) זה חושב כהספק חשמלי של 10 קו"ט אשר יפעיל מתקן חימום (מערכת גיבוי חשמלית).

ניצולת הסולר לייצור הספק חשמלי בגנרטור נקבעה ל 35%. חישוב ניצולת הסולר לייצור אנרגיית חום מחושב על פי המשוואה הבאה :

$$E_H = 0.35 * (P_H + P_T) / P_T$$

כאשר : P_T = הספק הגנרטור במלואו

P_H = הספק המופנה למתקן חימום

E_H = ניצולת סולר

במקרה וכל הספק הגנרטור מופנה לצרכים אחרים ($P_H=0$), ניצולת הסולר לחימום היא של 35% .
במקרה וכל הספק הגנרטור מופנה להפעלת מערכת חימום ($P_H=P_T$), מתקבלת ניצולת של 70% .

אולם כאשר הגנרטור מופעל לצרכים אחרים (כגון חמצניות, משאבות), ניתן להתייחס לעודף החום כתוספת אנרגיה שאין לחייב אותה בשימוש בסולר לצרכי חימום. ובאותה מידה, כאשר חלק מהספק הגנרטור מופנה למתקן חימום, "נחייב" את מרכיב החימום רק בחלק היחסי של הסולר (נטו לחימום). על סמך ראייה זו, חישוב מתוקן לניצולת הסולר נטו לחימום יהיה :

$$E_N = 0.35 * (P_H + P_T) / P_T * (P_T / P_H) = 0.35 * (P_H + P_T) / P_H$$

כאשר E_N = ניצולת סולר נטו לחימום

במקרה הנתון, מתוך 30 KVA ינוצלו 20 KVA לצרכים אחרים ו 10 KVA בלבד ינוצלו לצרכי חימום, תהיה ניצולת הסולר לחימום נטו 140%.

במקרה ומערכת הגיבוי תהיה משאבת חום, יהפוך ההספק לחימום של 10 קו"ט להספק בפועל של 40 קו"ט. במקרה זה יתקבלו כ 70 קו"ט הספק לחימום הנדרשים לחימום הבריכות (30 + 10X4) לפיכך ניצולת הסולר נטו במקרה של משאבת חום כמערכת השלמה וגיבוי יהיה :

$$E_N = 0.35 * (P_H + P_T) / P_H = 0.35 * (10*4 + 30) / 10 = 245\%$$

יתרון : שימוש באנרגיה עודפת

חסרונות : יש צורך במערכת חימום נוספת כגיבוי להספקת חום נידרש בשעות השפל.

אומדן השקעה במערכת ניצול חום של הגנרטור : 30,000 ש"ח (7,500 דולר)

עלות טיפול ותחזוקה שנתית כ- 3500 ש"ח (875 דולר)

אורך חיים : 10 שנים

טבלה 6 : שעות תעו"ז של חברת חשמל

מחיר קוט"ש (באגורות (סנט)	מס. שעות	שעות ביממה (ימי א-ה)	הגדרת התעריף	תשלום קבוע ש"ח	תקופת השנה
67.74 (16.9) 38.10 (9.5) 17.79 (4.4)	6 8 10	מ 8 עד 14 מ 14 עד 22 מ 22 עד 8	פסגה גבע שפל	84.81	קיץ
80.91 (20.2) 35.25 (8.8) 18.13 (4.5)	4 10 10	מ 17 עד 21 מ 7 עד 17 מ 21 עד 7	פסגה גבע שפל	84.81	חורף
47.17 (11.8) 38.78 (9.7) 16.79 (4.2)	14 - 10	מ 7 עד 21 - מ 21 עד 7	פסגה גבע שפל	84.81	מעבר

לצורך פישוט החישוב נעשתה הנחה כי הגנרטור יפעל 14 שעות ביממה, בשעות פסגה וגבע. בשאר

10 השעות ביממה יופעלו מערכות החשמל, כולל מערך חימום לגיבוי, בתעריף שפל של 4.33

סנט/קוט"ש. תעריפים מקורבים לשעות פסגה, גבע ושפל מפורטים בטבלת הספציפיקציות. סך

שעות העבודה של הגנרטור בשנה, לצרכי חימום הם 3416 שעות (14 X 244 ימי חימום).

מערכת הגיבוי תפעל 1382 שעות , להספקת חימום בשעות שפל וכהשלמה להספק החסר.

4.8 – חישוב מחליף חום לבריכות

מחליפי החום בבריכות מיוצרים מחומר פלסטי פוליפרופילן הטבול במערכת הטיפול של מי הבריכה. שטח החלפת החום של מחליף החום בבריכה תלוי בהפרש משוקלל בין טמפרטורת מי הבריכה לטמפרטורות כניסה ויציאה ממחליף החום. חישוב הפרש טמפרטורות משוקלל :

$$\Delta T_{LM} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$$

כאשר :

$$\Delta T_{LM} = \text{הפרש טמפרטורה ממוצע במחליף החום}$$

$$\Delta T_1 = \text{הפרש טמפרטורה בכניסה למחליף החום}$$

$$\Delta T_2 = \text{הפרש טמפרטורה ביציאה ממחליף החום}$$

$$A = q / (U * \Delta T_{LM}) = [m_h * C_{p,h} * (T_{hin} - T_{hout})] / (U * \Delta T_{LM}) \quad \text{חישוב שטח פני מחליף חום} :$$

כאשר :

$$q = \text{שטף חום נדרש (וואט)}$$

$$A = \text{שטח מחליף החום (מ"ר)}$$

$$U = \text{מקדם מעבר חום של חומר (W/m}^2\text{K)}$$

$$m_h = \text{ספיקת מסית של נוזל חם (m}^3\text{/s)}$$

$$C_{p,h} = \text{קיבול חום של המים החמים (J/kg K)}$$

$$T_{hin} - T_{hout} = \text{טמפרטורת כניסה ויציאה ממחליף החום}$$

על מנת שמחליף החום יחושב כמרכיב קבוע בכל חלופות החימום הגדרנו טמפרטורת כניסה למחליף החום לפי החלופה המספקת את הטמפרטורה הנמוכה ביותר בכניסה למחליף החום. ישנם שתי חלופות שמספקות מים בטמפרטורה יחסית נמוכה להחלפת חום : חימום סולארי וחימום ע"י מים גאותרמיים. הטמפרטורה להחלפת החום נקבעה ל 38°C . במקרה זה שטח פני החלפת החום הנדרש הוא 16 מ"ר לבריכה, ולצרכי ביטחון נניח 20 מ"ר (מקדם בטחון של 25%). סה"כ 80 מ"ר לכל 4 הבריכות. ספיקת מי החלפת החום תעמוד על 2.5 מק"ש לכל בריכה (סה"כ 10 מק"ש).

אומדן השקעה במחליף החום : 19,200 ש"ח, לכל ארבעת הבריכות (לפי 60 דולר/מ"ר) אורך חיים = 10 שנים.

4.9 - מסך תרמי

המסך התרמי בדומה למחליף החום מהווה מרכיב קבוע לכל חלופת חימום מהסיבה שהוא משמש כחומר בידוד לבריכות ולא כתוספת אנרגיה. עקרון הפעלת מסך תרמי היא כיסוי הבריכות בגובה מינימלי אפשרי מעל פני המים ודפנות הבריכות. המסך מבודד את הבריכות ע"י הפחתה בשחרור קרינה ארוכת גל מפני הבריכה והקטנת מקדם מעבר חום בהולכה המקטין איבודי חום בהולכה. המסך עשוי מחומר פלסטי (פוליאתילן) בעובי 150 מיקרון.

על פי היצרן המסד התרמי מסוג "שחור לבן" סגור, מקטין את איבודי החום בכ- 30%. במחקר קודם בבריכות גינוסר נבדק השימוש במסד תרמי אחר, מסוג אלומינט ובו לא נמצאה השפעה משמעותית של מסד האלומינט על הקטנת איבוד החום מהבריכות.

אומדן ההשקעה במסד תרמי : 25,000 ש"ח
עלות טיפול ותיקונים שנתית : 3000 ש"ח
אורך חיים = 5 שנים.

דף ריק – לטבלה 7: ריכוז נתונים טכניים

5. השוואת עלויות של שיטות החימום

השוואת העלויות של שיטות החימום השונות נעשתה בשתי גישות:

(1) חישוב מדדי עלות,

(2) חישוב עלות שנתית.

בגישה הראשונה חושבו מדדי עלות אנרגיה, מדד השקעה ומדד עלות כוללת, לכל חלופת חימום עצמאית וללא מערכת חימום לגיבוי. המדדים מצינים למעשה את עלות הקוט"ש בכל שיטה. גישה זו מאפשרת בחינת כל חלופה בפני עצמה, באופן שיאפשר הסקת מסקנות כלליות.

לעומת זאת, בגישה השנייה חושבו עלויות שנתיות (של אנרגיה, תחזוקה והחזר הון להשקעה) עבור התנאים בחג"מ עין יהב.

בכך למעשה מושגות מטרות העבודה לגבי בחינת מערך חימום לחג"מ עין יהב, יחד עם התיחסות כללית יותר לחלופות חימום לתנאי נגב - ערבה.

ההנחות לחישוב המדדים הם:

ריבית להחזר הון = 8%	
ריבית להון חוזר = 4% (בהנחה שההוצאה נעשית לאורך זמן באופן אחיד)	
תקופת החזר הון = לפי אורך חיי המתקן (בשנים)	

עלות סיחור מים דרך מחליף חום הוזנחה בגלל שמדובר בהספקי שאיבה זניחים, מלבד במקרה של מים גיאותרמים (בהחלפת חום).

בנוסף, נבדקה השפעת מסך תרמי על העלויות השנתיות, וכן בוצע ניתוח רגישות למחיר המים החמים בחלופת החלפת החום (חלופה ב').

5.1 - מדדי עלות

מדדי עלות מבטאים עלות המנורמלת ליחידת input או output כלשהי. במקרה זה הוגדרו ארבעה מדדים:

מדד תיפעולי (Operational Index) OI - מדד המבטא את מחיר האנרגיה החומנית בכל אחת מהחלופות. המדד מחשב את מחיר האנרגיה לחימום, ביחידות של סנט ליחידת קוט"ש חומני (אנרגיה הנמסרת כחום למי הבריכה), בכל חלופה.

מדד השקעה (Investment Index) II - מדד המבטא את גודל ההשקעה במתקן החימום, מנורמל ליחידת תפוקה, כלומר ליחידת הספק חומני. המדד מבוטא ביחידות של דולר השקעה ליחידת קוט"ש מיוצר כחום.

מדד השקעה + מחליף חום II+EX - מדד המבטא את ההשקעה במתקן החימום כולל ההשקעה במחליף החום המוסר את החום למי הבריכה.

מדד עלות כוללת (Total Cost Index TCI) - מדד המבטא את העלות הכוללת של החימום לכל חלופה. המדד משקלל את עלות האנרגיה לתיפעול ואת ההשקעה לבסיס שווה של יחידת אנרגיה חומנית קוט"ש. המדד מורכב משני מרכיבים: מרכיב תיפעולי הכולל את OI בתוספת ריבית על הון חוזר, ומרכיב השקעה + תחזוקה הכולל את II מוכפל במקדם החזר הון (לפי מס. שנות חיי המתקן וריבית על ההון), בתוספת תחזוקה שנתית (מנורמלת להספק). כיוון שההוצאות מנורמלות ליחידת אנרגיה (קוט"ש) אשר מיוצרת רק בחלק מהשנה, אזי מרכיב ההשקעה מחולק בחלק היחסי של השנה בה מתקן החימום מופעל (שעות עבודה בשנה, ללא קשר לכמות האנרגיה המיוצרת באותן שעות).

ניתן להתייחס אל המרכיב התיפעולי כעלות משתנה ואל מרכיב ההשקעה + תחזוקה כעלות קבועה.

משוואות חישוב של המדדים מופיעות בנספח.

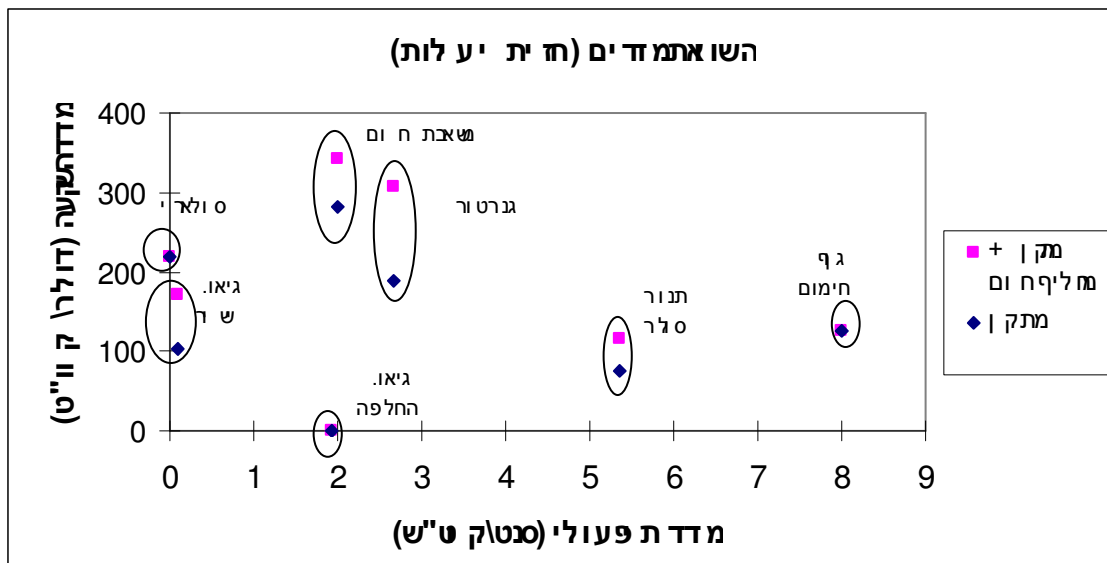
יש להדגיש כי במדדי העלות אין התייחסות למערך גיבוי, לשילוב בין שיטות או למסך תרמי. טבלה 8 מציגה את תוצאות חישוב מדדי העלות.

טבלה 8: מדדי עלות לחלופות חימום עצמאיות

לא גיבוי, ללא מסך תרמי		OI		II		II+EX		מרכיב תיפעולי	מרכיב השקעה+תחזוקה	TCI
חלופה	שיטה	מדד תיפעולי (עלות אנרגית חימום)	מדד השקעה (דולרקוט)	מדד השקעה+מ"ח (דולרקוט)	מדד תיפעולי (אנרגיה)	ומחליף חום (סנטקוט"ש)	עלות כוללת (סנטקוט"ש)	מדד עלות כוללת (סנטקוט"ש)	מדד	
א	גיא.ישיר	1.93	0	0	2.01	0.00	2.01	2.01		
ב	גיא.החלפה	0.09	104	171	0.09	0.58	0.68	0.68		
ג	תנור סולר	5.35	75	117	5.57	0.54	6.11	6.11		
ד	משאבת חום	2.00	281	341	2.08	1.21	3.29	3.29		
ה	גוף חימום	8.00	125	125	8.32	0.69	9.01	9.01		
ו	סולארי	0.00	218	218	0.00	1.77	1.77	1.77		
ז	גנרטור-תעוז	2.68	188	307	2.78	1.98	4.76	4.76		

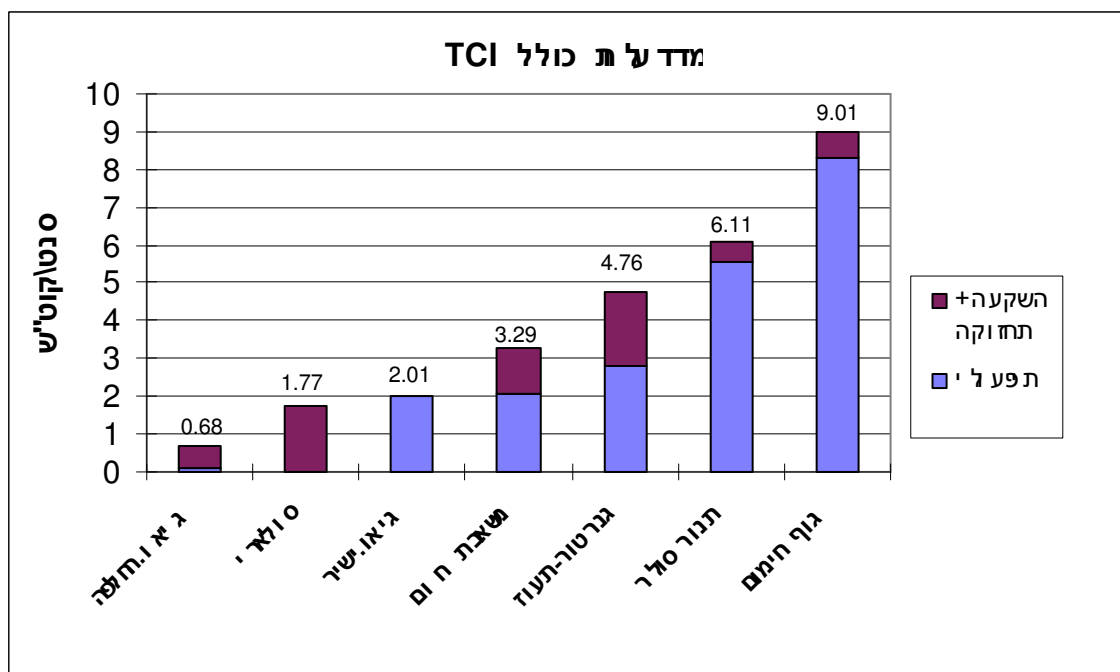
ראשית נבחן את המדד התיפעולי ומדד ההשקעה. גרף של מדד תיפעול כנגד מדד ההשקעה בחלופות השונות מוצג באיור 3 (גרף חזית יעילות). החלופות הקרובות יותר לראשית הצירים בגרף זולות יותר מהשיטות המרוחקות.

נראה כי שתי השיטות המתבססות על חימום במים גיאותרמיים זולות משאר חלופות החימום בהשקעה ובתיפעול. לשיטת החימום הסולארי מדד השקעה גבוה אך ללא עלויות תיפעול.



מדד העלות הכולל (TCI) מביא את שני המדדים (OI ו II) לבסיס השוואתי זהה. איור 4 מציג את מדד העלות הכולל, עם שני מרכיביו, לפי סדר עולה של עלות קוט"ש.

איור 4 : מדד עלות כולל לחימום (כולל מחליף חום)



מתקבל שעלות הקוט"ש בחימום במים גיאותרמים על ידי החלפת חום הוא הזול ביותר, ובאופן משמעותי משאר החלופות (0.68 סנטקוט"ש). הסיבה לכך היא שנדרשת השקעה יחסית נמוכה במחליף חום וצנרת הובלה, ואין למעשה עלויות תיפעוליות.

שתי החלופות הבאות, חימום סולארי ומים גיאותרמים בהספקה ישירה מראות על עלות של 1.77 ו 2.01 סנטאקוט"ש, בהתאמה. בחלופת המים הגיאותרמים בהספקה ישירה לא קיימת כלל השקעה וכל העלות נזקפת למחיר המים. ומאידך, בחלופה של חימום סולרי קיימת השקעה נכבדה, אך העלות התיפעולית זניחה (הוזנחה עלות סיחרור המים). בשאר החלופות קיים מרכיב נכבד של עלות אנרגיה המייקר את עלות החימום.

5.2 עלויות שנתיות

השוואת החלופות על פי מדדי עלות הקוט"ש נותנת השוואה תיאורטית לשיטות עצמאיות. על מנת להעריך איזו מבין חלופות החימום זולה יותר בתנאי חג"מ עין יהב, חושבו העלויות השנתיות. ניתוח זה, מתבסס על פתרונות מעשיים של שילוב מערכות גיבוי ואומדן שעות עבודה של כל חלופה, בהתאם לנתונים בחג"מ שהוגדרו בספיציפיקציות לתיכנון. טבלה 9 מציגה את תוצאות ניתוח העלות השנתית של החלופות השונות.

טבלה 9 : מרכיבי עלות שנתית

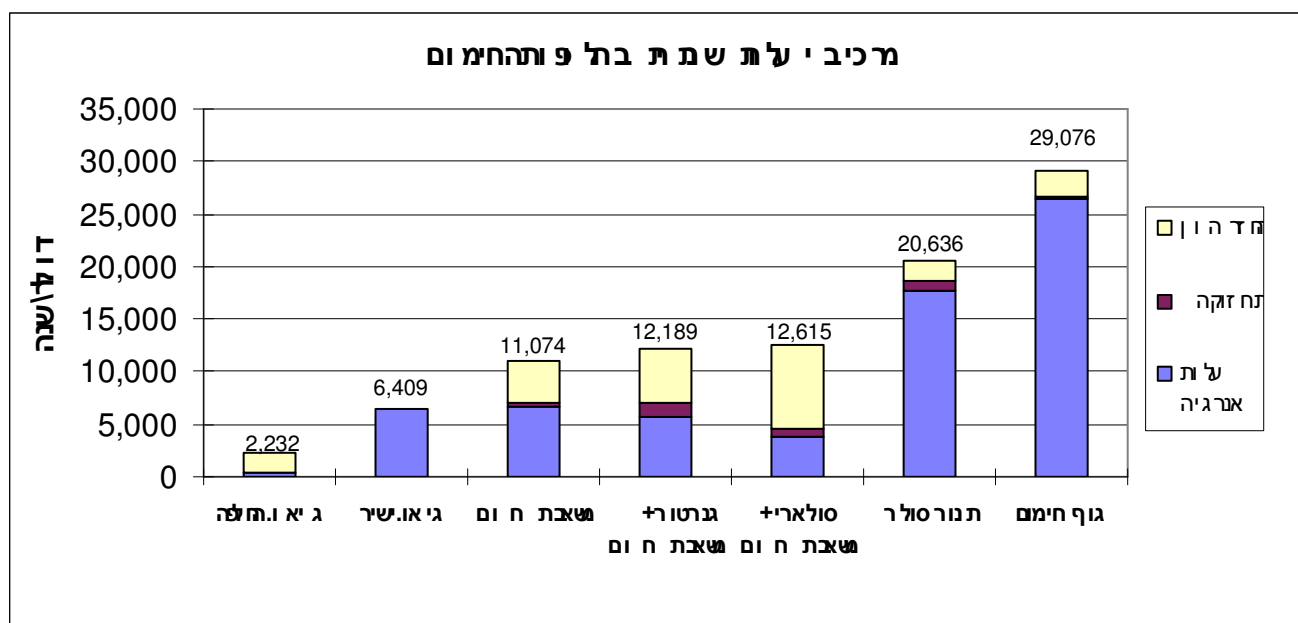
סלל גיבוי, ללא מסך תרמי	עלות אנרגיה מתקן חימום (דולר/שנה)	עלות אנרגיה גיבוי (דולר/שנה)	עלות אנרגיה מתקן + גיבוי (דולר/שנה)	תחזוקה שנתית (דולר/שנה)	השקעה כוללת (דולר)	החזר הון שנתי (דולר/שנה)	עלות כוללת (דולר/שנה)
א גיאון. ישיר	6,409	0	6,409	0	0	0	6,409
ב גיאון. החלפה	299	0	299	100	12,300	1,833	2,232
ג תנור סולר	17,742	0	17,742	875	13,550	2,019	20,636
ד משאבת חום	6,630	0	6,630	375	27,300	4,068	11,074
ה גוף חימום	26,521	0	26,521	50	10,000	2,505	29,076
ו סולארי + מש.ח.	0	3,898	3,898	625	54,300	8,092	12,615
ז גנרטור + מש.ח.	3,761	1,992	5,752	1,250	34,800	5,186	12,189

בחינת העלות השנתית של החלופות מציגה תמונה שונה במידה מסוימת לעומת מדדי העלות שהוצגו בסעיף קודם.

גם העלות השנתית מצביעה על השימוש במים גיאותרמים כזול ביותר, כאשר החלפת חום היא החלופה הזולה ביותר באופן בולט (כ 2200 דולר/שנה). העלות השנתית בחלופה הבאה, הספקה ישירה של מים גיאותרמים (כ 6,400 דולר/שנה) נובעת ממחיר המים החמים.

שלושת החלופות שבהן נעשה שימוש במשאבת חום משאבת חום בלבד, סולארי + משאבת חום וגנרטור + משאבת חום) הן החלופות הבאות ועלותן נעה בקירוב בין 11,000 עד 12,000 דולר/שנה. החלופה של חימום הסולארי עם גיבוי של משאבת חום היא החלופה שבה עלות התיפעול היא הנמוכה ביותר מביניהן, אך ההשקעה גבוהה ביותר.

יש לציין כי בדיקה של חלופת הגנרטור עם משאבת חום (בתעריף תעו"ז) לא הראתה כי נוצר חסכון כספי מעצם השימוש בתעריף תעו"ז לצריכת החשמל של החג"מ (20 KVA) בשאר שעות היממה.



5.3 השפעת מסך תרמי

ההשפעה של מסך תרמי על העלויות השנתיות נבחנה, תחת הנחות מסוימות המפורטות להלן :

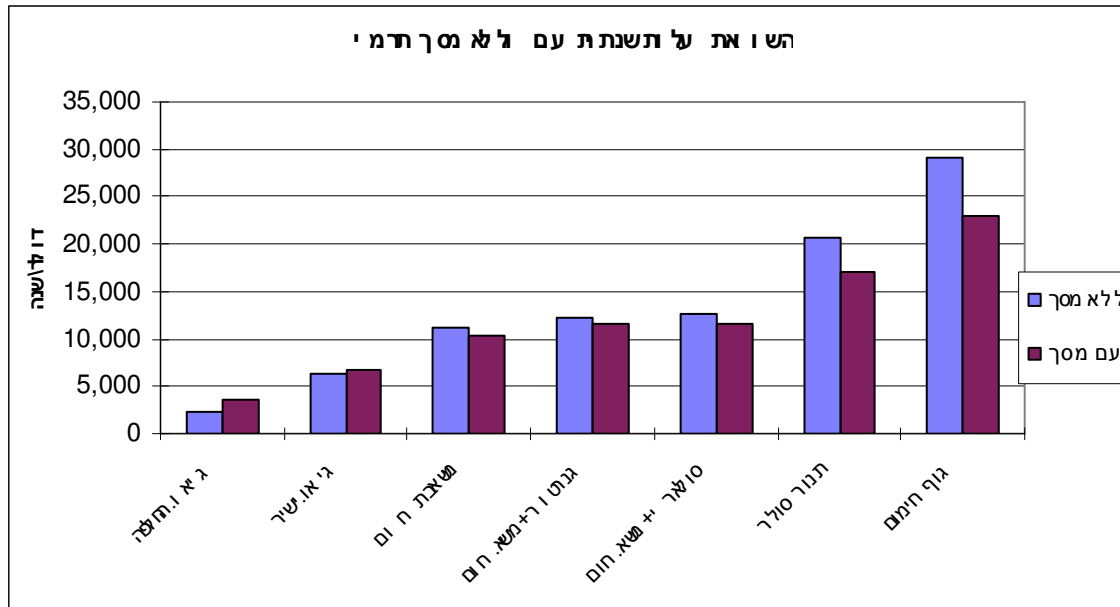
- השקעה במסך תרמי - 6,250 דולר
- תחזוקה - 750 דולר/שנה
- אורך חיים - 5 שנים
- הקטנת איבוד החום ב 30% (איבוד חום מהבריכות 140 וואט/מ"ר)
- הקטנת השקעה במתקני החימום האחרים - ב 20%

מעבר להנחות אלו לא בוצעו שינויים נוספים בחישוב העלות השנתית של החלופות השונות.

איור 6 מציג את העלויות השנתיות עם וללא מסך תרמי. מתקבל שעבור שתי החלופות של המים הגיאותרמיים מגדיל המסך התרמי את העלות השנתית ב 400 עד 1300 דולר/שנה.

לעומת זאת, בשלושת חלופות של משאבת החום מתקבלת הוזלה של 600 עד 1,000 דולר/שנה, ובחלופות של תנור הסולר וגוף חימום מתקבלת הוזלה של 3,600 עד 6,000 דולר/שנה.

איור 6 : השפעת מסך תרמי



5.4 מחיר מים גיאותרמיים בהחלפת חום

השימוש במים חמים להחלפת חום מהווה החלופה הזולה ביותר וזאת על בסיס ההנחה שמחיר מ"ק מים אלו הוא אפס (מלבד עלות שאיבה), כיוון שהמים מוחזרים למאגר.

בוצע ניתוח רגישות של עלות השנתית עבור שינוי במחיר המים הגיאותרמיים, למקרה שהשימוש במים יחויב במחיר כלשהו.

מתקבל שבמחיר שימוש במים הגיאותרמיים (להחלפת חום) של 0.095 דולר/מ"ק, משתווה העלות השנתית עם החלופה של הזרמה ישירה של מים גיאותרמיים (שמחירם 0.225 דולר/מ"ק).

במחיר שימוש של מים גיאותרמיים (להחלפת חום) הגבוה מ-0.2 דולר/מ"ק תהיה החלופה של משאבת החום זולה יותר.

נבדקה גם הרגישות של מדד העלות הכולל לשינוי במחיר המים הגיאותרמיים. נמצא שהחל ממחיר של 0.08 דולר/מ"ק, יהיה החימום הסולארי זול מהחימום באמצעות החלפת חום של המים הגיאותרמיים.

6. מקורות מידע

1. אטלס אקלימי לתכנון פסי וסביבתי בישראל, 1994, ביתן א., רובין ש., הוצאת רמות, אוניברסיטת ת"א.
2. מוזס נ., אשכנזי א., סגינר עזר ת., נבו א., דפני ז., וינובר ד., 1999, "שיפור כושר הייצור באמצעות אופטימיזציה מאזן חום בבריכות דגים אינטנסיביות מחופות בחממות", דוח מחקר מסכם, נמסר למדען ראשי של משרד החקלאות, מס 894-0071-96.

טבלה 7: ריכוז נתוני טכניים לחלופות חימום עצמאיות (בהתאם לנתוני מו"פ עין יהב וביחס לאיבודי חום מקסימליים)

צורך במחליף חום	צורך בגיבוי צורך	שעות עבודה בשנה	משך הפעלה ביממה	יעילות ניצול אנרגיה	כמות אנרגיה ביחידת תשומה	מחיר יחידת תשומת אנרגיה	טיפול ותחזוקה	אורך חיים (שנה)	השקעה (\$)	הספק נומינלי	שיטת חימום	חלופה
-	-	4604	24	100%	11.6 קוט"ש/מ"ק (10°C)	0.225 \$/מ"ק מים חמים	-	-	0	72 קו"ט (ספיקת מים 150 מ"ק"י)	מים גיאותרמיים בהזרמה ישירה	א
+	-	4604	24	100% (60%)	7 קוט"ש/מ"ק (6°C)	0.0063 \$/מ"ק עלות שאיבה	100	10	7,500	72 קו"ט (ספיקת מים 250 מ"ק"י)	מים גיאותרמיים בהחלפת חום	ב
+	-	4604	24	70%	10 קוט"ש/ליטר סולר	0.375 \$/ליטר סולר	875	10	8,750	100,000 ק"ל/שעה מיוצר	תנור סולר	ג
+	-	4604	24	400%	1 קוט"ש	0.08 \$/קוט"ש	375	10	22,500	20 קו"ט נצרך	משאבות חום	ד
-	-	4604	24	100%	1 קוט"ש	0.08 \$/קוט"ש	50	5	10,000	80 קו"ט	גופי חימום חשמליים	ה
-	+ 2707 שע. גיבוי	1952 (244x8)	8	30%		0	250	10	27,000	124 קו"ט בשעות קרינה	חימום סולארי	ו
+	+ 1383 שע. גיבוי	3416 (244x14)	14	140%		0.375 \$/ליטר סולר	875	10	7,500	10 KVA + 30 קו"ט	גנרטור בתעריף תע"ז	ז
			24					10	3,770		מחליף חום	
			16	איבודי חום ב הקטנת 30%			750	5	6,250		מסך תרמי	