

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

ISRAEL INSTITUTE OF –TECHNION TECHNOLOGY

הפקולטה להנדסת חשמל ומחשבים



Control Robotics and Machine Learning Laboratory

המעבדה לבקרה רובוטיקה ולמידה חישובית

פרויקט א'

הנושא:

ASFKAט אנרגיה מותמדת עברור מקום חיוני דל אמצעים

מנגנים:

גיא דאובר

אלעד יצחק

מנחה:

מייקל פרל

סמסטר: חורף תשפ"ב

שנה: 2022

הקדשה ותודות

אנו רוצים להקדיש פרויקט זה להוריינו היקרים :

חיים דאובר שיבדל לחיים ארוכים

רחל דאובר זיכרונה לברכה

מנשה יצחק שיבדל לחיים ארוכים

חלי גל שתבדל לחיים ארוכים

תודות :

אנו רוצים להודות למנהל שלנו מייקל פרל, אשר ליווה אותנו לכל אורך הדרכ במהלך הפרויקט.
בנוסף, אנו רוצים להודות מהנדס המעבדה קובי כוחי על הגמישות ועל ההבנה על הצורך בדוחית תאריך ההגשה של הפרויקט.

תוכן עניינים

פרק 1	שימוש באנרגיה מתחדשת כפתרון לצורך אנרגיה בלתי תלوية בראשת החשמל.....	1
פרק 2	מרקם הפתרון	2
2.1.	ר��ע למרחב הפתרון	2
2.2.	מקורות אנרגיה מתחדשים	3
2.2.1.	מערכות אנרגיה סולארית	3
2.2.2.	אנרגיות רוח	3
2.2.3.	אנרגיות מים	4
2.2.4.	מאגרי אנרגיה	4
2.2.5.	אגירת מים שאובה	4
2.2.6.	אגירת אויר דחוס	4
2.2.7.	סוללות נתרן גופרית	4
2.2.8.	סוללות חומצת עופרת	5
2.2.9.	סוללות ניקל קadmיום	5
2.2.10.	סוללות זרימה (תאי דלק מתחדשים)	5
2.2.11.	סוללות ליתיום	5
2.2.12.	קבילים	5
2.2.13.	2.4. ניתוח כלכלי ופתרון אופטימילי	6
פרק 3	יישום הפתרון	7
3.1.	ניתוח מאגר המידע	8
3.2.	ניתוח פשוטני	8
3.3.	ניתוח מאגר מידע של המשטמש	8
3.4.	אנליזה מורחבת	9
3.5.	אופטימיזציה לפי עיקרון Energy Matching	9
פרק 4	שימוש בمطلوب ככלי לנתח ולפתרון	13
4.1.	הגדרת האנליזה המורחבת	13
4.2.	תהליך האופטימיזציה לפי עיקרון Energy Matching	14
פרק 5	תוצאות	18
5.1.	5.1. ניתוח צריכת החשמל	19
5.2.	צריכת החשמל השנתית	20
5.3.	צריכת החשמל היומיית	21
5.4.	צריכת החשמל השנתית	22
5.5.	יכולות השימוש במקורות המתחדשים	22
5.6.	ניתוח פשוטני	23
5.7.	5.3. אנליזה מורחבת	24
5.8.	ניתוח שנתי	24
5.9.	ניתוח חודשי	26
5.10.	ניתוח יומי	28

30.....	ENERGY MATCHING	5.4
ניתוח שנתי.....		
33.....		
ניתוח חודשי.....		
36.....		
ניתוח יומי.....		
38.....		5.5
פרק 6 השוואת שווי האופטימיזציות השוניים.....		
41.....		
השוואה מול מערכת קיימת.....		
42.....		
פרק 7 סיכום ומסקנות.....		
46.....		
פרק 8 רישימת נספחים.....		
48.....		
נספח 1 : מקורות אנרגיה מתחדשים.....		
48.....		
מערכות אנרגיה סולארית.....		
50.....		
אנרגיות רוח.....		
53.....		
אנרגיות-מים.....		
54.....		
אנרגיות גיאותרמיות.....		
55.....		נספח 2 : מאגרי אנרגיה.....
55.....		
אנרגיות מים שאובות.....		
55.....		
אנרגיות אויר דחוס.....		
55.....		
סוללות נתרן גופרית.....		
56.....		
סוללות חומצת עופרת.....		
56.....		
סוללות ניקל קadmיום.....		
56.....		
סוללות זרימה (תאי דלק מתחדשים).....		
56.....		
סוללות ליתיום.....		
56.....		
קבלים.....		
57.....		נספח 3 : אופטימיזציה לפי נטווי מערכת.....
57.....		
עקבות אחר נקודת ההספק המקסימלית.....		
57.....		
השפעת הממתה של תחנה פוטו-וולטאית על רשות ההפעלה.....		
57.....		
השפעת התדר של תחנה פוטו וולטאית על רשות ההפעלה.....		
58.....		
נספח 4 : ניתוח כלכלי של רשות חכמה בעלת גנרטור יחיד.....		
59.....		
נספח 5 : ניתוח קוד ה- MATLAB.....		
61.....		
נספח 6 : קבועי ה- CSV הדרושים על מנת להגדיל את מאגר המידע.....		
71.....		
72.....		פרק 9 ביבליוגרפיה.....

רשימת איורים

7.....	איור 1 : שלבי תוכנית ה- MATLAB
8.....	איור 2 : ניתוח מידע לדוגמה – ניתוח שנתי עבור אלסקה
10.....	איור 3 : דוגמה של חלון סיוכום למספר נדרש של פאנלים סולאריים
10.....	איור 4 : דוגמה של חלון סיוכום למחירים, וערכי הספק מירביים
10.....	איור 5 : דוגמה לשימוש במקורות אנרגיה מתחדשת
11.....	איור 6 : דוגמה לשימוש במקורות אנרגיה מתחדשים בגרף אחד
11.....	איור 7 : דוגמה לשימוש במאגרי אנרגיה
11.....	איור 8 : דוגמה לשימוש במאגרי אנרגיה בגרף אחד
12.....	איור 9 : דוגמה לגרף של מצב טעינה למאגר האנרגיה הכללי
14.....	איור 10 : בлок חישוב מספר הפאנלים הסולאריים הדרוש
14.....	איור 11: בлок אופטימיזציה ראשונית
15.....	איור 12 : בлок אופטימיזציה מתוקנת, הכוללת הספק פוטו-וולטאי
15.....	איור 13 : בлок חישוב מגרי אנרגיה
16.....	איור 14 : בлок של מצב הטעינה
16.....	איור 15: בлок אופטימיזציה של האגירה
17.....	איור 16 : תרשימים זרימה המותאר את תהליך האופטימיזציה
19.....	איור 17 : אנליה של צריכת החשמל בבית חולים טיפוסי בטקסס במשך שנה
20.....	איור 18 : ממוצעי טמפרטורה ביוסטון, טקסס
20.....	איור 19 : פרופיל צריכת החשמל השנתית בטקסס בשנה
20.....	איור 20 : ערכי מקסימים ומינימום של צריכת החשמל בטקסס בשנה
21.....	איור 21 : פרופיל צריכת החשמל המומוצעת עבור כל יום בטקסס במשך שנה
21.....	איור 22 : צריכת החשמל המומוצעת עבור כל יום בטקסס בחודש يول�
21.....	איור 23 : צריכת החשמל המומוצעת עבור כל יום בטקסס בחודש דצמבר
22.....	איור 24 : צריכת החשמל השנתית בטקסס ביום טיפוסי בחורף (1/12) וביום טיפוסי בקייז (1/7)
22.....	איור 25 : מהירות הרוח המומוצעת במשך שנה ביוסטון, טקסס
23.....	איור 26 : אנרגיית הקירינה הסולארית המומוצעת ביוסטון, טקסס
23.....	איור 27 : חלונית סיוכום עבור מגרי האנרגיה בניתוח הפשטייני
23.....	איור 28 : חלונית סיוכום עבור מקורות האנרגיה המתחדשים בניתוח הפשטייני
24.....	איור 29 : אנליה מורחבת – סיוכום השימוש במקורות האנרגיה במשך שנה
24.....	איור 30 : אנליה מורחבת – סיוכום השימוש במאגרי האנרגיה במשך שנה
25.....	איור 31 : אנליה מורחבת – SOC במשך שנה
25.....	איור 32 : אנליה מורחבת – חלונית סיוכום המשאבים הדרושים והעלויות במשך שנה
26.....	איור 33 : אנליה מורחבת – סיוכום השימוש במקורות האנרגיה בחודש דצמבר
26.....	איור 34 : אנליה מורחבת – SOC בחודש דצמבר
26.....	איור 35 : אנליה מורחבת – חלונית סיוכום המשאבים הדרושים והעלויות בחודש דצמבר
27.....	איור 36 : אנליה מורחבת – סיוכום השימוש במקורות האנרגיה בחודש يولאי

27.....	איור 37 : אנליזה מוגרחת – SOC בחודש יולי
27.....	איור 38 : אנליזה מוגרחת – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות בחודש יולי
28.....	איור 39 : אנליזה מוגרחת – סיכום השימוש במקורות האנרגיה ב- 16/9
28.....	איור 40 : אנליזה מוגרחת – SOC ב- 16/9
29.....	איור 41 : אנליזה מוגרחת – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות ב- 16/9
30.....	איור 42 : Energy Matching – מספר הפאנלים הדרושים וערכיהם קרייטיים במהלך שנה
30.....	איור 43 : Energy Matching – סיכום השימוש במקורות האנרגיה במהלך שנה
31.....	איור 44 : Energy Matching – סיכום השימוש במאגרי האנרגיה במשך שנה
31.....	איור 45 : SOC – Energy Matching
32.....	איור 46 : Energy Matching – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות במהלך שנה
33.....	איור 47 : Energy Matching – סיכום השימוש במקורות האנרגיה בחודש דצמבר
33.....	איור 48 : SOC – Energy Matching
33.....	איור 49 : Energy Matching – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות בחודש דצמבר
34.....	איור 50 : Energy Matching – מספר הפאנלים הדרושים וערכיהם קרייטיים בחודש דצמבר
34.....	איור 51 : Energy Matching – סיכום השימוש במקורות האנרגיה בחודש יולי
34.....	איור 52 : SOC – Energy Matching
35.....	איור 53 : Energy Matching – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות בחודש יולי
35.....	איור 54 : Energy Matching – מספר הפאנלים הדרושים וערכיהם קרייטיים בחודש יולי
36.....	איור 55 : Energy Matching – סיכום השימוש במקורות האנרגיה ב- 16/9
36.....	איור 56 : SOC – Energy Matching
37.....	איור 57 : Energy Matching – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות ב- 16/9
37.....	איור 58 : Energy Matching – מספר הפאנלים הדרושים וערכיהם קרייטיים ב- 16/9
38.....	איור 59 : מקרה קצה – SOC מקבל ערכיהם שליליים
38.....	איור 60 : Energy Matching – סיכום מקורות האנרגיה באספקה במהלך שנה
39.....	איור 61 : Energy Matching – מספר הפאנלים הדרושים, השטח הדרושים וערכיהם קרייטיים עבור ניתוח שנתי וניתוח חודשי באספקה
39.....	איור 62 : Energy Matching – SOC בניו יורק במהלך שנה
40.....	איור 63 : Energy Matching – סיכום השימוש במקורות האנרגיה בניו יורק במהלך שנה
41.....	איור 64 : השוואת האופטימיזציות השונות
43.....	איור 65 : השוואת ה- Energy Matching מול שני מאמרים
44.....	איור 66 : גраф השוואת עלות כוללת של ה- Energy Matching מול שני מאמרים לאורך 30 שנה
44.....	איור 67 : סיכום השוואת עלות כוללת של ה- Energy Matching מול שני מאמרים
45.....	איור 68 : סיכום השוואת עלות כוללת של ה- Energy Matching מול שני מאמרים לאורך 30 שנה

איור 69 : עקומת מקסימום ההספק של מערכ PV	57
איור 70 : מגל שקול של חוויה סולארית המחויבת לרשת החשמל	57
איור 71 : SGED פשוט ללא אילוצים	59
איור 72 : SGED פשוט עם אילוצים	60
איור 73 : תרשימים זרימה – פונקציות תוכנית ה- MATLAB	61
איור 74 : תיאור קובץ ה- CSV עבור צריכת החשמל	71
איור 75 : תיאור קובץ ה- CSV עבור מג האוויר	71

מילון מונחים

Mini grid : רשת חשמל קטנה ואוטונומית. רשת מבוזרת ומקומית.

SOC : מצב טעינה (State of Charge) של מאגר אנרגיה באחזים. טעינה יחסית למילוי קיבולת האנרגיה של מאגר.

מקורות אנרגיה ירוקים : מקורות אנרגיה טבעיות בצדור הארץ, אשר אינם מזוהמים (אינם פולטים חליקים כדוגמת פחמן דו חמצני).

Capital cost : עלות חד פעמיות המתחייבת את עלות ההקמה של מתקן, מפעל, או ציוד מסוים. בambilים אחרים זו הูลות הנדרשת על מנת להביא את המתקן במצב בו ניתן להפעילו (לדוגמה, עלות הקמת חוות סולארית).

Operation cost : עלות זו הינה הูลות המשויכת לתפעול המערכת. עלות זו הינה עלות משתנה לפי פעולות המערכת (לדוגמה, לאחר שימוש מסוים בחוות סולארית ישנו בלאי ועלויות תחזוקה מסוימות. עלויות אלה הן עלויות תפעול).

Energy matching : עמידה בעומס הצריכה, תוך טעינה בקצב מקסימלי של מאגרי האנרגיה, תחת אילוצים שונים כדוגמת מזג האוויר.

פקטור צריכה הפסק : וקטור המכיל הספקים לאורך פרק זמן (יום, חודש, שנה ועוד), כאשר כל איבר מכיל הספק לשעה בודדת.

Economic dispatch : תפעול כלכלי. פתרון משווהות זרימת ההספק בראשת, תוך התחשבות בפונקציות מחיר של מקורות הייצור כפונקציה של ההספק המיוצר, ותחת אילוצים שונים על המקורות השונים.

קיינה סולארית : הספק ליחידת שטח אשר מגיע מהשמש לפני הצדור הארץ, ונitin לביצוע המטרה لأنרגניה חשמלית.

פרק 1 שימוש באנרגיה מתחדשת כפתרון לצורכי אנרגיה בלתי

תלויה בראשת החשמל

אחד האתגרים המודוברים בשנים האחרונות ברחבי העולם הוא ההתחממות הגלובלאלית. תהליך זה התחיל בהדרגה מיימי המהפכה התעשייתית ואת השפעותיו אנו מרגשים היום ביותר. השפעותיה של ההתחממות העולמית כוללות את עליית גובה פני הים, שינויים בכמויות המשקעים ואופן פיזורים. שינויים אלו עשויים גם להגדיל את התידירות ואת העוצמה של אירופאי מג אוויר קיצוניים, כמו שיטפונות, בצורות, גלי חום והוריקנים, לגראם לדבר, להקטין את כמות המים הזורמים בנחלים בקץ, או לתרום להחדרת מינימום ביולוגיים, הנתונם כבר היום בסכנת הכחדה. ההשפעות של שינויים האקלים על בני האדם הוו, בין היתר, אינם על הביטחון התזונתי בשל ירידה בתנובות החקלאיות, נטישה של אזורים מיושבים ונזק לתשתיות שנגרם מעליית מפלס פני הים. [1]

כמפורט מכך, עולה הסוגיה כי ההתחממות העולמית היא תוצאה של פוליטה של גז חממה (מעשה ידי אדם). ההסכמה עם טינה זו, הובילה לכך על פוליטיקאים בעולם לנ��וט צעדי חקיקה שיצמצמו את השימוש במקורות אנרגיה מתקלים, יעדדו מעבר לשימוש במקורות אנרגיה חלופיים, ובאופן כלשהו יפחיתו את חותם הפחמן של מדינות העולם. לכן, נרצה לספק אנרגיה זו בעזרת מקורות אנרגיה מתחדים ולא תחנות חשמל מזוהמות.

לדוגמה, צרכני אנרגיה גדולים וחינויים, כדוגמת בית חולים (המחווה את מקור ההתחממות בפרויקט זה) מחוויבים באספקת אנרגיה בכל עת ובכל תנאי מג אוויר. ישנן מדיניות בהן לא ניתן לספק זאת (מדינות עולם שלישי בעיקר). בעזרת מקורות אנרגיה מתחדים ניתן ליצור mini-grid-ים וכך למלא צורך זה, תוך יכולות כלכליות ועמידה באילוצים שונים. חלק מקורות האנרגיה המתחדים (אנרגיה הידרואלקטרית לדוגמה) הינם מקורות היכולים לספק אנרגיה רציפה ואמינה בכל ימות השנה. שאר מקורות האנרגיה המתחדים אינם רציפים, אך בעזרת מאגרי אנרגיה ניתן להבטיח רציפות ואמינות.

לכן, מטרת הפרויקט העיקרית הינה בחינת האפשרות לאספקת אנרגיה מתמדת עבור מקום חינויי דל אמצעים, ללא הסתמכות על ראש החשמל האזורי.

פרויקט זה מקדם את פתרונו הסוגיות דלעיל בזכות הדברים הבאים :

1. הצגת הניתוח החשמלי של בית החולים וניתוח המידע לאור תנאי מג האויר.
2. השוואת סוגים שונים של אופטימיזציה כלכלית לפי דרישות שונות של המשתמש.
3. קבלת פתרון אופטימלי לעליות הקמה ותפעול של mini-grid-ים באמצעות "ירוקים" בלבד.
4. הפתרון המוצע נותן מענה עבור כל מתקן או רשות אשר ירצה לנתח את צrichtת החשמל שלו ולעבור לרשף מקומית "ירוקה".

במהלך הדוח נרחיב על הרקע התיאורטי הנדרש לצורך הפתרון המוצע (פרק 2), בפרט על מקורות מתחדים (פרק 2.2), מאגרי אנרגיה (פרק 2.3), עיקרי הניתוח הכלכלי ובחירה פתרון אופטימלי (פרק 2.4). לאחר מכן, נציג את שלבי הפתרון שלו (פרק 3) על ידי הסברת הלוגיקה ושלבי הניתוחים שעברנו במהלך הפרויקט. בשלב הבא, נסביר את הדרך לניתוח ופתרון הבעיה (פרק 4) ונציג את תוצאות הניתוח בשלבים השונים (פרק 5). לבסוף, נסכם, נציג את המסקנות ונרחיב על רעיונות לפרויקטים מתקדמים על סמך פרויקט זה (פרק 6).

פרק 2 מרכיב הפתרון

2.1. רקע למרחב הפתרון

כרך לפרויקט, יש צורך בהבנה אקדמית ברמה בסיסית אודות מעגלים חשמליים ומערכות הספק בקנה מידת מתח גבוה, ייצור חשמל ואגירת אנרגיה.

בנוסף, יש להבין נושאים עקרוניים וחשובים לצורך ניתוח נכון ועמוק של המידע, ובניה מהימנה של הפתרון המוצע: מקורות אנרגיה מתחדשים, אופן פעולתם, ועולות הכלכליות (פרק 2.2), מתקני אגירת אנרגיה, אופן פעולתם, ועולות הכלכליות (פרק 2.3), ניתוח כלכלי של מערכות הספק ופתרון אופטימלי, הכלול אילוצים (פרק 2.4).

בנוסף, יש להכיר דוגמה של פרויקט עומס בקנה מידת גבול מספיק, ולאורך תקופה ארוכה דייו, על מנת להכליל את המערכת המוצעת, כאשר בפרויקט זה נעשו שימוש במידע אודות בתים חולמים ברחבי ארצות הברית לאורך תקופה של שנה שלמה. [2]

הכלי העיקרי הנדרש הינו כלייעיל לניתוח נתונים המאפשר הצגה נגישה וmps, וממשק חיצוני ידידותי למשתמש, כאשר בפרויקט זה נעשו שימוש בمطلوب (פרק 3,4,5 והרחבה נוספת נספפת ניתן למצוא בנספחים 5,6).

יצור החשמל ברחבי העולם מאנרגיה מתחדשת הולך ונעשה משמעותי. אנרגיה מתחדשת מבוססת על מקורות טבעיות כגון שמש, רוח ומים. קיים צורך נוסף לתשתיות נרחבות של אגירת אנרגיה יعلاה, על מנת לאפשר אמינות בייצור החשמל ובספקתו בכל זמן, בכל תנאי ובכל מצב. המעבר לאנרגיה מתחדשת מצריך מערכת הכוללת ייצור ושינוע של חשמל בצורה מבוזרת, תוך שימוש ב- mini grids. ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת הולך ונעשה זול יותר וזמן יותר, עם התפתחות הטכנולוגיות השונות ויידידת המחרירים. בנוסף, שימוש באנרגיה מתחדשת הוא כורה למציאות, לאור ההתחממות הגלובלית, ומשבר האקלים אשר הולך ומחמיר.

התהליך מתחילה בניתוח נתוני צריכת האנרגיה של בית חולמים טיפוסי, הכלול עומס שעתי במשך שנה שלמה. הנתונים מקיף וככל חלוקה לתקופות שונות, ומהידע כמו ערבי מינימום ומקסימום הספק, וכן ממוצע וסטטיסטית תקן.

במהלך ניתוח הנתונים יאומטו מספר מאפיינים טיפוסיים: עליית הצריכה במהלך שעות הצהרים עקב פעילות נרחבות בשעות העבודה, וירידתה במהלך הלילה, עלייה בצריכה במהלך ימי חול ביחס לסופי שבוע וחגים, עלייה בחורף לעומת הקיץ בשל שימוש נרחב באמצעות חיים.

על סמך סיבות אלה, יש לשקלל את כלל הגורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה, הן מבחינת תנאי מזג אוויר ותשתיות, והן מבחינת הערות הכלכליות לתפעול ותחזוקה ולהקמת מתקן חדש של צריכת אנרגיה או אגירתה.

לאחר מכן, מבוצעת התאמת הצריכה לאנרגיה למקורות אנרגיה מתחדשים ומאגרים מסווגים שונים, אשר יכולים לספק בייעילות את האנרגיה הדרושה לבית החולמים מבחינה כלכלית, תשתיותית, ובהתאם לתנאי מזג האוויר באיזור. לבסוף, מסופק פתרון אופטימלי תחת כלדרישות וכל האילוצים (הספק מינימלי ומקסימלי לכל מתקן, מצב טעינה חיובי ושאיינו משתנה בנסיבות כל הנitin, ותנאי מזג האוויר).

2.2. מקורות אנרגיה מתחדשים

בחלק זה נציג סוגים שונים של מקורות אנרגיה מתחדשים. מקורות טבעיות בצדorus הארץ, כמו שמש, רוח ומים, אוגרים בתוכם צורות שונות של אנרגיה, אשר ניתן להמיר לאנרגיה חשמלית ולנצל כתחליף לגנרטורים קונבנציונליים. מקורות אלה מתחדשים, בעיקר בהתאם לתנאי מזג האוויר. הרחבה נוספת ניתן לראות בנספח 1.

מערכות אנרגיה סולארית

אנרגייה סולארית היא אנרגיה שמקורה בקרינת השמש. מתקני אנרגיה סולארית ממירים את הקרינה האלקטרומגנטית ש מגיעה מהשמש לאנרגיה תרמית או לחשמל. [3]

שימוש באנרגיית השמש לייצור חשמל יתכן באחת משתי דרכי:

- **קיצירת אנרגיה תרמו-סולארית:** חימום נוזל לצורך הפעלת מנוע חום שמייצר חשמל (או עבודה מכנית).

- **קיצירת אנרגיה פוטו-וולטאית:** שימוש בתאים פוטו-וולטאיים להמרת אור לזרם ישיר. בשנים האחרונות חלה עלייה בייעילות פאנלים סולאריים וירידה במחירות. מודול פוטו-וולטאי (ידעו בכינויו – פאנל סולארי), או PV, הוא מכלול של תאים פוטו-וולטאיים המאוגדים במסגרת להתקנה. אוסף של מודולי PV נקרא פאנל PV ומערכת של לוחות היא מערכת סולארי.

כל מודול מדורג ע"י הספק הפלט DC שלו בתנאי בדיקה סטנדרטיים (STC). لكن הספק היוצא בשטח יכול להשנות. היעילות של המודול קבועה את שטחו בהתחשב באותה תפוקה.

בטכנולוגיה כיום, ציפויי ההספק (שניתן להפיק בדרך זו) לייחידת שטח נמוכה יחסית (פחות מ- $\frac{kW}{m^2}$ 1) لكن קיצירת אנרגיית השימוש יקרה ולא תמיד כדאית כלכלית. עלויות הקמת

המערכת עבור מערכות אנרגיה סולאריות הין $\frac{\$}{kW} 1400 - 1100$. עלויות התפעול עבור

$$\text{מערכות אלה הין } \frac{\$}{MWh} 43 - 48 [4]$$

אנרגיית רוח

אנרגיית רוח היא אנרגיה המנצלת את התנועה של הרוח בקו ישיר (אנרגייה קינטית) וממירה אותה לאנרגיה זמינה. [5]

הפקת חשמל מאנרגיית הרוח מבוססת על טורבינות רוח בים או ביבשה. טורבינה מודרנית מכילה 3 להבים אופקיים על מגדל גבוה, אשר מסתובבים עם כיוון הרוח, חוגה וגנרטור. הטורבינות מבוססות על סנכרון בין מהירות החוגה למחרות הגנרטור, כאשר סנכרון בתדר ובקרה מתבצעים לעיתים קרובות באמצעות רשת החשמל. טורבינות בים יכולות להיות גדולות יותר מטורבינות ביבשה. בדרך כלל יוצרים חוות טורבינות על מנת ליעיל את תהליך הייצור וההפקה.

עלויות הקמת המערכת הין $\frac{\$}{kW} 1200 - 1700$ עבור חוות יבשתיות ו- $\frac{\$}{kW} 3400$ עבור

$$\text{חוות ימיות. עלויות התפעול הין } \frac{\$}{MWh} 30 - 60 [6]$$

אנרגיות מים

בשלבי המאה ה- 19 הפכה אנרגיית המים למקור לייצור חשמל. את האנרגיה מתנועת המים ניתן להساب בקלות לחשמל על ידי ניצול זרימת המים לשיבוב גלגל (טורבינה), המייצר אנרגיה חשמלית. האטר שבו מותמרת האנרגיה ממים מכנית לחשמלית נקרא "תחנת כוח הידרואלקטրית". [7]

תחנות מבוססות על 2 שיטות עיקריות: א. מאגר וסכר - תחנה קלה לבנייה ועובדת ללא הרבה הפרעות. ב. זרימת נהר- תחנה המשמשת גם לאגירת אנרגיה, ומאפשרת גמישות שימוש באנרגיה המיווצרת.

תחנות מבוססות אנרגיות מים הין תלויות מיקום, ומחולקות ל-4 גדלים שונים. בתחום הנעשה שימוש בטורבינות מסווגים שונים, בהתאם לגובה המים.

עלויות הקמת מפעל הידרואלקטורי הין $\frac{\$}{kW} = 2000 - 1000$. עלויות התפעול הין

$\frac{\$}{MWh} = 63.9$. [8]

2.3. מאגרי אנרגיה

מערכות אלה יכולות להזיל עלויות באופן משמעותי, תוך מתן מענה לצריכת אנרגיה משתנה בטווח הארוך, והפצת האנרגיה הנאגרת בצורה יעילה וგמישה. יש צורך במאגרי אנרגיה זמינים ויציבים במשך שעות רבות ועד חודשים. [9], [10], [11] הרחבת נוספת ניתנת לראות בסוף 2.

אגירת מים שאובה

אגירת מים שאובה הינה שיטה פשוטה מאוד ונפוצה, ומתאימה לקיבולת של ~ 1000 [MW]. בשיטה זו ניתן להשתמש בו כמקור אנרגיה והוא כמאגר אנרגיה, לפי הצורך, תוך שימוש בשני מאגרי מים בגבהים שונים ובטורבינה. נהוג להשתמש במאגר ראשי בסדר גודל של 1200-700 מי על מנת לשמור על דו כיווניות ונצילות גבוהה. העלות הכלכלית דומה להן הראשוני עבור מקור אנרגיית מים.

אגירת אויר דחוס

בשיטת זו נעשה שימוש בדיחיסת אויר בכלים קיבולתיים, השומר על לחץ גבוה יותר מהלחץ האטמוספרי, ובחרchetbeno. במאגר מסווג זה, בדומה לאגירה שאובה, נעשה שימוש בטורבינה רוח דו כיוונית. אגירה זו אינה נפוצה, אבל מתאימה לקנה מידת גדול.

סוללות נתרן גופרית

סוללה זו מתפקדת בטמפרטורה גבוהה- 300°C. האלקטרודות עשויות חומרים מומסימים, ובסיס הפעולה מושתת על התגובה הכימית ביניהם. החומרים נפיצים, אבל באופן כללי אמינים. לסולולות אלה זמן תגובה מהיר, אנרגיה מוצאת של [kWh] 400, מחזור חיים של 15 שנים, ונצילות של 85%.

סוללות חומצת עופרת

הניצילות של סוללות אלה נמצאת בטוחה 75-85% DC-DC. בשל הזרילה בסוללות מסווג זה, הן אינן מתאימות לאגירת אנרגיה לטוחה ארוך. בעורת תכנון נכוון, זמן החיון של הסוללות יכול לנوع בטוחה של 30-15 שנים. סוללות אלה טובות במיוחד לאגירה לסירוגין של אנרגיה מתחדשת כמו רוח או מים, על מנת לאפשר רציפות באספקתה.

סוללות ניקל קadmיום

לסוללות אלה צפיפות אנרגיה, מתקדמות טוב בטמפרטורות נמוכות, אבל יקרות יותר. הניצילות שלתן נעה בטוחה של 70%, זמן החיון שלתן הינו כ-15-10 שנים, והזרילה בהן מהירה יחסית - עד 5% בחודש.

סוללות זרימה (תאי דלק מתחדשים)

סוללות אלה מהוות שילוב של סוללות שגרתיות עם תאי דלק. הייחודה בהן מותבṭא בכך שאגירת האנרגיה מתבצעת בתאים חיצוניים המושרים לאלקטרודות, והאנרגיה נשאבת פנימה והחוצה במידה הצורך. זמן התגובה שלתן יחסית איטי.

סוללות ליתיום

סוללות אלה קלות מאוד, בעלות צפיפות אנרגיה גבוהה וזמן חיים ארוך.

קבלים

לצורך אגירת אנרגיה נעשה שימוש בקבלים אלקטրוכימיים הפעילים באופן דומה לסוללות, כדי לאפשר אחסון כמות גדולה של אנרגיה. כל קבל יכול לתמוך במתוח של עד 7.9V, כדי לשמר על התכונות הרצויות. תוך שימוש באלקטרוליט אורגני ניתן לתמוך במתוח של עד 2.7V, ובכל מקרה נהוג לאחד הרבה קבלים יחדיו על מנת להגדיל של המתוח הנוכחי. הקבלים יכולים לתפקיד לפחות עשרות אלפי מוחזורים, עם זרילה יחסית קטינה, בעיקר עבור האלקטרוליט האורגани. הזרילה עלולה להקטין אגירה לטוחה ארוך, אך ניתן להגיע לניצילות של 95% בעזרת מוחזר מהיר. צפיפות האנרגיה של הקבלים ממוצעת, אך זמן התגובה שלהם מהיר יותר.

קיבולת האנרגיה שלהם נמוכה יחסית, ויש צורך בהמרת מתחכם מסווג DC-AC על מנת לתמוך במתוח יציאה קבוע.

2.4. ניתוח כלכלי ופתרון אופטימלי

כפי שצוין לעיל, ישנו צורך במציאת פתרון אופטימלי מבחןת עלות כלכלית וזמןית האנרגיה המתחדשת – דהיינו לפי מצב מזג האוויר.

מבחןת כספית – יש לאפיין את יצרני האנרגיה ואת מאגרי האנרגיה באמצעות פונקציות מחיר. זאת על מנת לתת ערך כספי לכל מתקן במונחים של עלות ליחידת הספק ועלות ראשונית כך שייהיה ניתן לתעדף את הפתרון הול ביחס לעלותו הכוללת.

מבחןת זמניות האנרגיה – ראשית, נבדוק האם בית החולמים נמצא ליד מקור מים שנitin לנצלו בשביל אנרגיה הידרואלקטրית. שנית, נמצא את מספר הפאנלים הדרוש (כך נוכל למצוא את המגבלה על האנרגיה הסולארית). לבסוף, נחליט מתי ניתן להשתמש באנרגיית הרוח לפי מהירותה (כאשר מהירות הרוח עוברת את מהירות הסוף ניתן להשתמש באנרגיית רוח).

לאור הגבלות אלה נוכל לבצע אופטימיזציה כלכלית. הרחבה נוספת עבור גנרטור יחיד, ניתן לראות בספקים 3 ו- 4.

בעזרת כל הנתונים דלעיל נבצע אופטימיזציה כלכלית. הפתרון האופטימלי יהיה הפתרון המינימלי לעליות כאשר התנאים הבאים מתקיים:

$$\left\{
 \begin{array}{l}
 0 \leq P_{Pv} \leq \binom{\text{number of solar}}{\text{panels required}} \cdot \binom{\text{Solar}}{\text{radiation}(t)} \\
 0 \leq P_{Wind} \leq P(t) + P_{charge}(t) \\
 0 \leq P_{Hydro} \leq P(t) + P_{charge}(t) \\
 -P_{charge}(t) \leq P_{Storage} \leq P(t) \\
 P_{PV} + P_{Wind} + P_{Hydro} + P_{Storage} = P(t) \\
 P_{charge}(t) = \frac{100 - SOC}{100} \cdot \binom{\text{max power}}{\text{storage}}; 0 \leq SOC \leq 100
 \end{array}
 \right.$$

נשים לב כי $P_{Storage}$ יכול להיות שלילי מכיוון שהספק שלילי הינו הסימון לטעינת המאגר.

גודל הטעינה המקסימלית יכול להיות החסר הזמני בהספק המתבטא במרקך של ה-SOC ממאה אחוז. נבהיר כי לאגירת האנרגיה נעשה אופטימיזציה נוספת כך שעליות אגירת האנרגיה ימוזעו.

פרק 3 יישום הפתרון

במהלך עבודתנו, בנו פרויקט אשר עובד על תוכנת Matlab. כחלק מהציגת הפתרון, למשתמש ישנה אפשרות בחירה לעבור על כל השלבים הלוגיים בניתוח חישמל כפי שאנו רצינו – מהציגת הצריכה החישמלית עד לניתוח שעני של הצריכה ואופטימיזציה של המקורות המתחדשים על מנת לקבל תחליף לחבר לרשות החישמל. נציג כי כל המשק שלנו הינו User – Interactive Dialog boxes. הרחבה נוספת על המطلב מתבצעת בעזרת המוגיעות אל המשתמש בעזרת Dialog boxes. הרחבה נוספת על המطلב ניתנת לראות בנספח 5.

במהלך הרצת התוכנית, נבעור דרך כמה שלבים (ראה איור 1) על מנת שהמשתמש יוכל ללמוד את דרכי הניתוח והשלבים שעברנו על מנת לקבל את האופטימיזציה הסופית:

1. נציג את ניתוח מאגר המידע המקומי.
2. יתקיים ניתוח פשוט של הצריכה. ניתוח זה יתרחש תחת הגבלות מאוד כלויות ולכן הוא נוטן סדר גודל כללי בלבד לתוצאות הסופיות. ניתוח זה מהווה את האופטימיזציה הכללית ביותר והואינו מתחשב כלל בתנוני מגז האוויר.
3. במהלך הפרויקט ניתנת אפשרות בחירה בין כמה אופטימיזציות:
 - 3.1. ניתנת למשתמש האפשרות לעדכן מאגר מידע משלו ולנטחו באויה צורה (הוראות לבניית קובץ מתאים ניתן למצוא בנספח 6). בנוסף, המשתמש יכול לנתח את מאגר המידע שלו בעזרת מאגר מקורות מתוחדים חדש ולא להשתמש במאגר הדיפולטיבי שלו.
 - 3.2. נבצע אופטימיזציה מדוקית יותר לניתוח מאגר המידע שלו. האופטימיזציה מתבצעת עבור כל שעה בנפרד ותלויה במזג אוויר, בקרבה למאגר מים ובמספר מקורות האנרגיה המתחדשת הנבחרים. ניתן לבצע על יום מסוים בשנה, חדש מסויים בשנה או על כל השנה. מכיוון שהאופטימיזציה זו מתחשבת בתנוני מגז האוויר ניתן לנתח את מאגרי המידע לצורה יותר מדוקיקת.
 - 3.3. נבצע אופטימיזציה לפי עיקרונו - Energy matching. לפי עיקרונו זה, טיעינת המאגר תתבצע במהירות האפשרית ובקצב המקסימלי הנתון לפי תנאי מגז האוויר. זו האופטימיזציה המרכזית והסופית שלנו.

Database analysis

Naive analysis (without weather data)

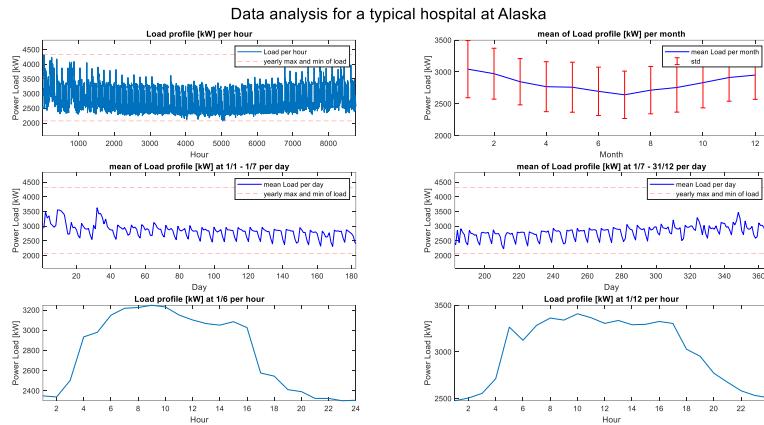
Analysis of the user's database and Naive analysis of user's database

Extended analysis of the database (including weather data)

Optimization by Energy Matching

ניתוח מאגר המידע

בשלב הראשון, למשתמש ישנה אפשרות בחירה לראות את המקומות המהווים את מאגר המידע שלנו. לאחר מכן, המשמש יכול לבחור במקום אחד (או יותר) על מנת להציג את נתוני הצריכה החשמלית של בית חולים טיפוסי במקום זה. מוצגים שישה גרפים למשתמש המתארים את הצריכה השעתית במשך שנה (איור 2):



איור 2 : ניתוח מידע לדוגמה – ניתוח שנתי עבור אלסקה

הגרף השמאלי העליון מתאר את צריכת החשמל השעתית במשך שנה, הגרף הימני העליון מתאר את צריכת החשמל החודשית המומוצעת במשך שנה. ניתן לראות את השונות בכל חודש. הגרפים בשורה האמצעית מתארים את צריכת החשמל היומית המומוצעת במשך שנה לפי מספר היום בשנה. הגרפים בשורה התחתונה מתארים את עקומת צריכת החשמל ביום ממוצע בחורף (הימני) ובקיץ (השמאל).

בנוסף, ישנה חלונית המתארת את הצריכה המקסימלית והמינימלית של בית החולים ומתי היא מתרחשת. יתר על כן, ישנה אפשרות לראות את צריכת החשמל בחודש ספציפי.

ניתוח פשוטי

במידה והמשתמש בחר לראות נתונים צריכה במקומות מסוימים, יתקיים ניתוח פשוטי של הצריכה. ניתוח זה יתרחש תחת הגבלות מאוד כליליות ומטרתו הינה לתת למשתמש סדר גודל לעליות וגדלי המאגר הנדרשים. במהלך הניתוח פשוטי, התוכנה מקבלת את ההספק המקסימלי השנתי ואת ההספק המינימלי השנתי במקומות מסוימים, לוקחת טווח ביטחון של שעורה אחוזים ומנתחת בצורה פשוטית את העליות הדרושים לשפק זאת תוך התחשבות באילו מקורות אנרגיה ומקורות אגירה אנו משתמשים.

ניתוח מאגר מידע של המשתמש

בשלב זה, ניתנת למשתמש האפשרות להכניס מאגר מידע משלו. לאחר מכן, מותבצע ניתוח של נתונים צריכת החשמל והציגם בדומה לשלב הראשון.

בנוסף, ניתנת למשתמש האפשרות להכניס למערכת מאגר מידע חדש עבור המקורות המתחדשים (ומאגר האנרגיה). לאחר מכן, מותבצע ניתוח של מאגר המידע שלנו (לפי המקורות המתחדשים של המשתמש) וניתוח של מאגר המידע של המשתמש לפי מקורות אלה.

אלגיזה מורחבת

בשלב זה, ניתנת למשתמש האפשרות לבצע אופטימיזציה מדויקת יותר לניתוח מאגר המידע שלנו. האופטימיזציה הינה שעתית ומתרכעת עבור כל שעה בנפרד ותלויה במזג אוויר ובקרבה למאגר מים ובמספר מקורות האנרגיה המתחדשת הנבחרים. ראשית, המשמש מתבקש לבחור מקום עבورو הוא רוצה לבצע אופטימיזציה. לאחר מכן, למשתמש ניתנת האפשרות לבצע ניתוח ביום מסויים, בחודש מסוים או לאורך כל השנה. לאחר מכן, המשמש נדרש לבחור בכמה מקורות אנרגיה להשתמש ובכמה מקורות אגירת אנרגיה להשתמש. בנוסף, ניתנת אפשרות למשתמש לשנות את הגבלות הדרושות של כל מקור בנפרד כתלות בדרישותיו. לאחר קבלת כל הנתונים הנדרשים, המערכת מבצעת את האופטימיזציה. לאחר מכן, נקבל חלונית סיכום המתארת את המחיר לתפעול המערכת (וממחיר הקמתה). לאחר מכן, ישנו תנאי של המערכת – מה הגודל הדורש לכל מקור.

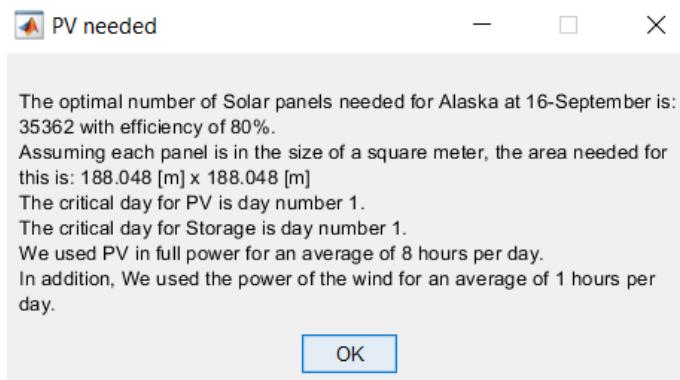
עבור ניתוח יומי, מתקבלים חלונית סיכום וחמישה גרפים. הגף הראשון מתאר סיכום של השימוש במוקורות האנרגיה המתחדשים בכל שעה. הגף השני הינו סיכום של השימוש במוקורות האנרגיה המתחדשים בכל שעה על גף אחד. סיכום זה שונה מהgef הראשון בכך שניינו להשוות בקטגוריות משתמשים בכל מקור ולהשווות זאת אל מול הצריכה הכלולת באותו שעה. הגף השלישי מתאר סיכום של השימוש במתקנים המתחדשים בכל שעה על גף אחד. סיכום זה שונה מהgef השלישי בכך שניינו להשוות במאגרים המתחדשים בכל שעה על גף אחד. הגף הרביעי מתאר סיכום של השימוש בקטגוריות מתי משתמשים בכל סוג מאגר, ומתי הוא טבעי. הגף החמישי מתאר סיכום של מצב הטעינה של מאגר האנרגיה הכללי לפי שעה. עבור ניתוח חודשי וניתוח שנתי, מתקבלים חלונית סיכום ושלושה גרפים. הגף הראשון מתאר סיכום של השימוש במוקורות האנרגיה המתחדשים בכל שעה. הגף השני מתאר סיכום של השימוש במתקנים המתחדשים לפי שעה. הגף השלישי מתאר סיכום של מצב הטעינה של מאגר האנרגיה הכללי לפי שעה.

בנוסף, ניתנת למשתמש האפשרות לבצע את האלגיזה המורחבת, כפי שתיארנו קודם, על המאגר שלו בעזרת מאגר המקורות המתחדשים שלנו.

אופטימיזציה לפי עיקנון Energy Matching

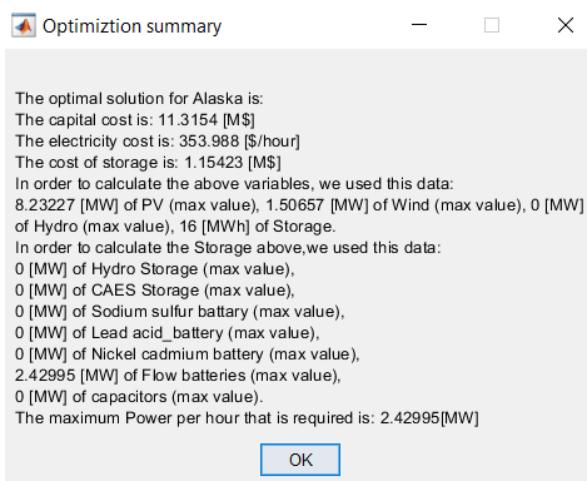
לבסוף, ניתנת למשתמש האפשרות לבצע אופטימיזציה לפי עיקנון Energy Matching. האופטימיזציה הינה שעתית ומתרכעת עבור כל שעה בנפרד ותלויה במזג אוויר ובקרבה למאגר מים. אופטימיזציה זו היא המדויקת ביותר שניתנת בתוכנה שלנו ומתחשבת בכל מה שלמדנו במהלך הפרויקט. ראשית, המשמש מתבקש לבחור מקום עבורו הוא רוצה לבצע אופטימיזציה (או להכנס מאגר מידע חדש). לאחר מכן, למשתמש ניתנת האפשרות לבצע ניתוח ביום מסויים, בחודש מסוים או לאורך כל השנה. המשמש נשאל האם בית החולים נמצא ליד מקור מים. לאחר קבלת כל הנתונים הנדרשים, המערכת מבצעת את האופטימיזציה.

לאחר האופטימיזציה, נקבל שתי חלונות סיכום. החלונית הראשונה (אייר 3) מתארת את מספר הפאנלים הסולאריים הנדרשים למערכת (כאשר ההנחה היא שככל פאנל סולארי הינו בגודל של מטר רבוע), מספר השעות בהם האנרגיה הסולארית ואנרגיית הרוח עובדות בכל עוצמתן ולא מתbezבזות אנרגיה (מנורמל לממוצע יומי) :



איור 3 : דוגמה של חלון סיכום למספר נדרש של פאנלים סולאריים

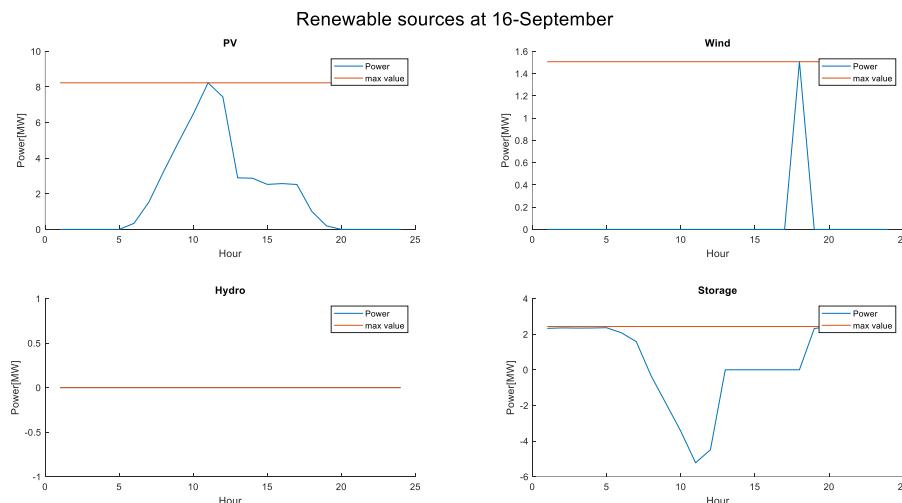
החלונית השנייה (איור 4) המתארת את המחיר לתפעול המערכת (וממחיר הקמתה) ותיאור של המערכת – מה הגודל הדורש לכל מקור :



איור 4 : דוגמה של חלון סיכום למחירים, וערכי הספק מירביים

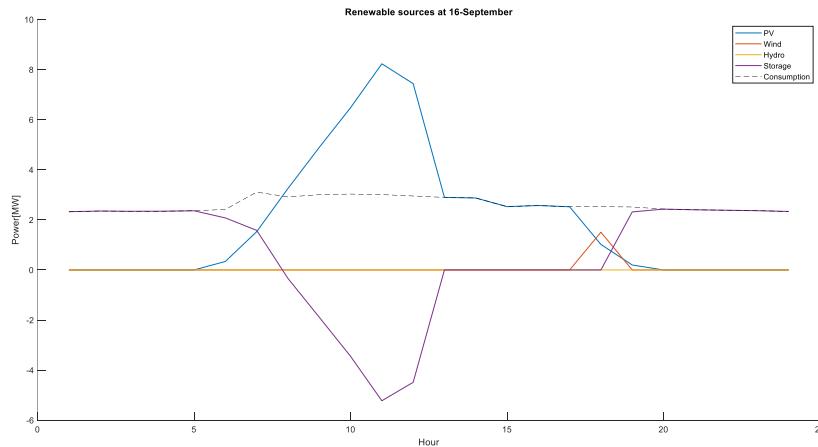
עבור ניתוח יומי, מתקבלים שתי החלוניות סיכום (איורים 3 ו- 4) וחמישת גרפים (איורים 5 עד 9).

הגרף הראשון (איור 5) מתאר סיכום של השימוש במקורות האנרגיה המתחדשים בכל שעה :



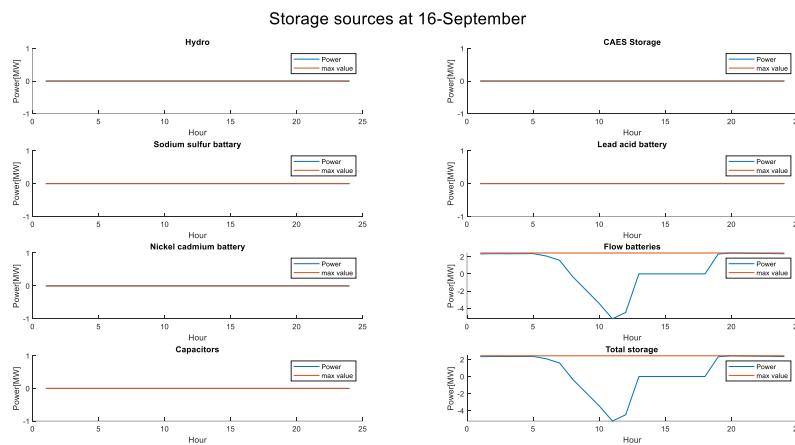
איור 5 : דוגמה לשימוש במקורות אנרגיה מתחדשת

הגרף השני (איור 6) הינו סיכום של השימוש במקורות האנרגיה המתחדשים בכל שעה על גוף אחד. סיכום זה שונה מהגרף הראשון בכך שניתן להשוות בклות متى משתמשים בכל מקור ולהשוות זאת אל מול הצריכה הכלכלת באוטה שעה :



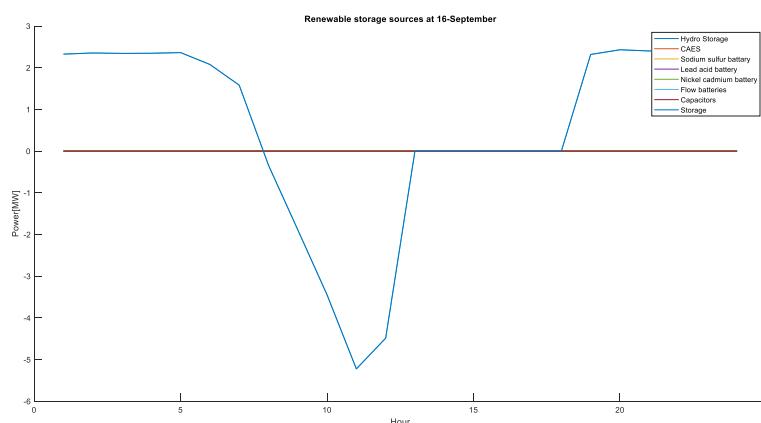
איור 6 : דוגמה לשימוש במקורות אנרגיה מתחדשים בגוף אחד

הגרף השלישי (איור 7) מתאר סיכום של השימוש במאגרים המתחדשים לפי שעה :



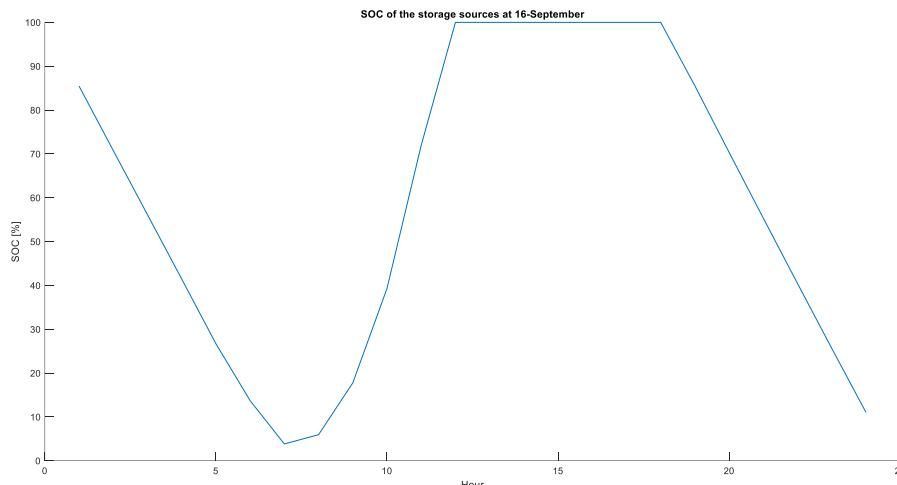
איור 7 : דוגמה לשימוש במאגרי אנרגיה

הגרף הרביעי (איור 8) מתאר סיכום של השימוש במאגרים המתחדשים בכל שעה על גוף אחד. סיכום זה שונה מהגרף השלישי בכך שניתן להשוות בклותمتى משתמשים בכל סוג מאגר, וממי הוא נטען :



איור 8 : דוגמה לשימוש במאגרי אנרגיה בגוף אחד

הגרף החמישי (איור 9) מותאר סיכום של מצב הטעינה של מאגר האנרגיה הכללי לפי שעה :



איור 9 : דוגמה לגרף של מצב טעינה למאגר האנרגיה הכללי

עבור ניתוח חודשי וניתוח שנתי, מתאפשרים שתי חלונות סיכום (איורים 3 ו- 4) ושלושה גرافים. הגרף הראשון מותאר סיכום של השימוש במקורות האנרגיה המתחדשים בכל שעה (איור 5). הגרף השני מותאר סיכום של השימוש במערכות המתחדשים לפחות במשך שעה (איור 7). הגרף השלישי מותאר סיכום של מצב הטעינה של מאגר האנרגיה הכללי לפי שעה (איור 9).

פרק 4 שימוש בمطلوب ככלי לניתוח ולפתרון

הגדרת האנגליזה המורחבת

על מנת לפתור את בעיית האופטימיזציה, השתמשנו בפונקציה `linprog`. פונקציה זו פותרת את הבעיה הבאה :

$$\min_x f^T \text{ such that } \begin{cases} A \cdot x \leq B \\ Aeq \cdot x = beq \\ lb \leq x \leq ub \end{cases}$$

אנחנו חיפשנו את העלות המינימלית שתקיים את התנאים הבאים (ערכי h -default) :
עבור מוקורות האנרגיה :

$$A_{8 \times 4} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

נסמן : b זהו הערך המקסימלי של הצריכה בפרק הזמן המבוקש.

$$B_{1 \times 8} = (b \ b \ b \ P(t) \ 0 \ 0 \ 0 \ \max(P(t)))$$

$$Aeq_{1 \times 4} = (1 \ 1 \ 1 \ 1); Beq = P(t)$$

לכן התנאים של הבעיה יראו כך :

$$\begin{cases} 0 \leq P_{PV} \leq P(t) + \max(P(t)) \\ 0 \leq P_{Wind} \leq P(t) + \max(P(t)) \\ 0 \leq P_{Hydro} \leq P(t) + \max(P(t)) \\ -\max(P(t)) \leq P_{Storage} \leq P(t) \\ P_{PV} + P_{Wind} + P_{Hydro} + P_{Storage} = P(t) \end{cases}$$

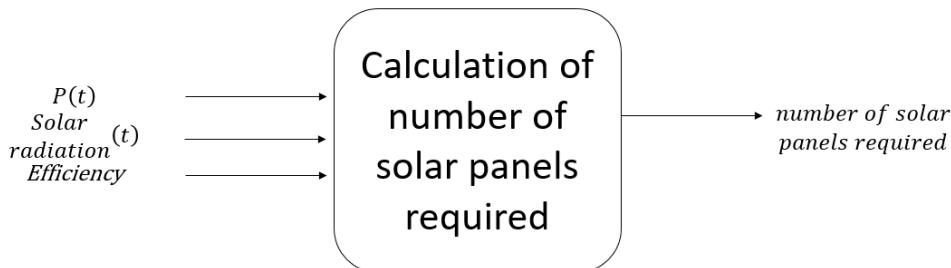
סביר את התנאים :

ארבעת התנאים הראשונים הינם גבולות ברירת המחדל שלנו עבור המוקורות :

1. עבור מוקורת האנרגיה (סולארי, רוח ומים) : נדרוש כי ההספק יהיה בין 0 לסקום של ערך ההספק הרגעי והמקסימום הגלובלי של וקטור צריכת ההספק. הגבול העליון נבחר כך על מנת שמקור אגירת האנרגיה יוכל להיטען בזמן השימוש (במקרה הגרוע ביותר זה יctrax להיטען בקצב של ההספק המקורי הנדרש) בזמן שמקור האנרגיה יונצל גם לשימוש הרגעי. הגבול התיכון נבחר כך על מנת שנוכל לא להשתמש במקור כלל עקב עלות גבוהה או עקב אי יכול שימוש או עקב אי צורך.
2. עבור מקור האגירה : נבחר את התנאי הזה על מנת שנוכל לטעון את מקורות האגירה במידת הצורך. הגבול העליון הוא ההספק המקורי הנדרש (אין לנו צורך בגבול עליון גדול יותר). בדומה, ישנה פונקציה אשר עשויה אופטימיזציה למקורות אגירת האנרגיה.

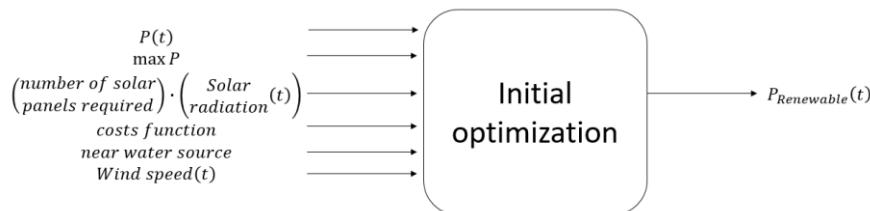
תהליכי האופטימיזציה לפי עיקרונו

ראשית נחשב את מספר הפאנלים הדרושים על מנת לספק את צורcit החשמל הדרישה לבית החולמים. נעשה זאת על ידי סכימות הדרוש באנרגיה כל יום ואת כמות הקרינה היומית. נחלק אחד בשני ונΚבל וקטור המתאר את מספר הפאנלים היומי הדרישה על מנת לספק את האנרגיה (כתלות בנזילות) וניקח את הערך המקסימלי.



אייר 10 : בלוק חישוב מספר הפאנלים הסולאריים הדרושים

כברירת מחדל, על מנת "להחליק" את המספר ולהתעלם מערכיים קיצוניים נבצע זאת גם בצורה שבועית וניקח את הערך המינימלי מביניהם, בנוסף, המשתמש יכול לבחור את מספר הימים שלפיהם "נחליק" את המספר. ישנה פשרה בין גודל מאגר האנרגיה לבין גודל החווה הסולארית. ככל שנגדיל את מספר הפאנלים נדרש מאגר אנרגיה קטן יותר ולהיפך. לכן, על מנת שלא נתחשב בערכים חריגים ונסוכל לנצל בצורה מיטבית את החווה הסולארית נctrיך "להחליק" את מספר הפאנלים הדרוש.

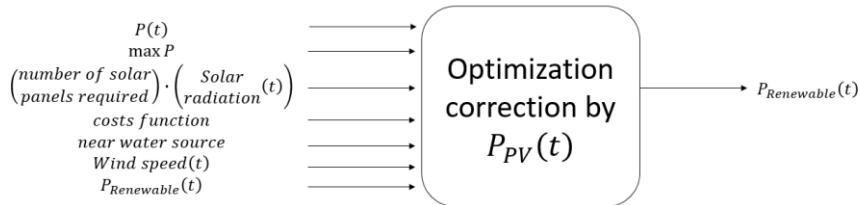


אייר 11 : בלוק אופטימיזציה ראשונית

נעזה ניתוח פשוטי עם התנאים הבאים :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{PV} \leq (\text{number of solar}) \cdot (\text{Solar radiation}(t)) \\ 0 \leq P_{Wind} \leq P(t) + \max(P(t)) \\ 0 \leq P_{Hydro} \leq P(t) + \max(P(t)) \\ 0 \leq P_{Storage} \leq P(t) + \max(P(t)) \\ P_{PV} + P_{Wind} + P_{Hydro} + P_{Storage} = P(t) \end{array} \right.$$

כעת קיבלנו את ערכי ההספק הדרושים.



איור 12 : בלוק אופטימיזציה מותקנת, הכוללת הספק פוטו-וולטאי

על מנת שנוכל לעשות אופטימיזציה נכונה נבדוק אם אנו משתמשים באנרגיה סולארית:

1. אם האנרגיה הסולארית אינה מספקת לשימוש של בית החולים – נבצע אופטימיזציה נוספת, ללא האנרגיה הסולארית:

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{Wind} \leq P(t) - P_{PV}(t) \\ 0 \leq P_{Hydro} \leq P(t) - P_{PV}(t) \\ 0 \leq P_{Storage} \leq P(t) - P_{PV}(t) \\ P_{Wind} + P_{Hydro} + P_{Storage} = P(t) - P_{PV}(t) \end{array} \right.$$

2. אם האנרגיה הסולארית יותר גבוהה מהדרישה של בית החולים – ננצל את כל האנרגיה הסולארית הניתנת. השתמש בעודף על מנת לטען את המאגרים.

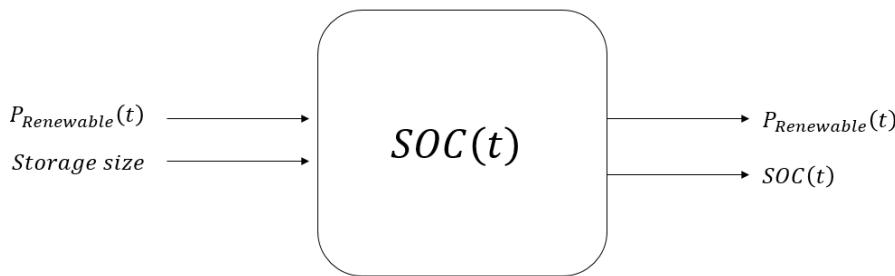
3. אם האנרגיה הסולארית שווה בדיקוק לדרישת בית החולים – השתמש רק באנרגיה סולארית, ללא טעינה.



איור 13 : בлок חישוב מנגנון אנרגיה

чисוב גודל המאגר : נбурר על השימוש. נסכום את האנרגיה הדורשה בין טעינות של המאגר בצורה הבאה – אם השתמש במאגר האנרגיה ($P_{Storage}(t) > 0$) נסכום זאת בוקטור חדש. ניקח את הערך המקסימלי להיות גודל מאגר האנרגיה. במידה והניתוח מתרחש עبور חדש או שנה ניקח את גודל המאגר להיות פי 2 מהערך המקסימלי למקורה ו"החלקנו" ערכיהם חרגיגים וכך שלא נחרוג מגודל המאגר האפשרי.

כחת נובל להגדר מודד חדש – SOC הבודק את מצב הטיעינה של המאגר.



איור 14 : בלוק של מצב הטעינה

ראשית נעדכו אותו לפי מצב השימוש בו :

$$SOC(t) = \begin{cases} SOC(t-1) - 100 \cdot \frac{P_{storage}(t)}{(Storage\ size)}, & t \geq 2 \cap P_{storage}(t) \neq 0 \\ SOC(t-1), & t \geq 2 \cap P_{storage}(t) = 0 \\ 100, & t < 2 \end{cases}$$

1. אם השתמש במאגר ($P_{storage}(t) > 0$) – SOC יקטן בהתאם.
2. אם נטען את המאגר ($P_{storage}(t) < 0$) – SOC יגדל בהתאם.
3. אם לא השתמש במאגר – SOC לא ישתנה.

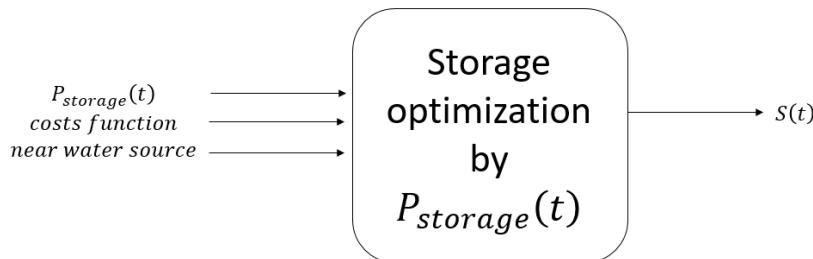
לאחר מכן נתקן את האופטימיזציה לפי הגדרת SOC :

1. נגידיר טעינה של מאגר האנרגיה גם כאשר משתמשים ברוח או במים. נעדכן את ה- SOC בהתאם (לאחר עידכון של $P_{storage}(t)$ בהתאם, נפעיל את המשוואות דלעיל).
2. אם SOC חצה את רף ה- 100% טעינה נעדכן את הצורך בטעינה לפי הגורם שגורם לכך (אנרגייה סולארית, אנרגיית הרוח או אנרגיית המים) – נגביל את המקור בגודל הטעינה ונעדכן את ה- SOC בהתאם – נגידיר גודל חדש :

$$P_{charge}(t) = \frac{100 - SOC(t)}{100} \cdot \left(\frac{\text{max power}}{\text{storage}} \right)$$

ונעדכן את המשוואת דלעיל בהתאם למקור האנרגיה שמטיען את המאגר כעת. נשים לב כי התבצע עידכון לשימוש במקורות האנרגיה המתחדשים לפי השינויים שהתבצעו לפי מדד מצב הטעינה (SOC).

לאחר שסימנו את האופטימיזציה עבור מקורות האנרגיה המתחדשים, כעת ניתן לבצע את האופטימיזציה עבור מאגרי האנרגיה.



איור 15 : בלוק אופטימיזציה של האגירה

נבדוק אם אנו משתמשים במאגרי האנרגיה :

- אם אנו משתמשים במאגרי האנרגיה – נעשה אופטימיזציה בעלת תנאים קבועים :

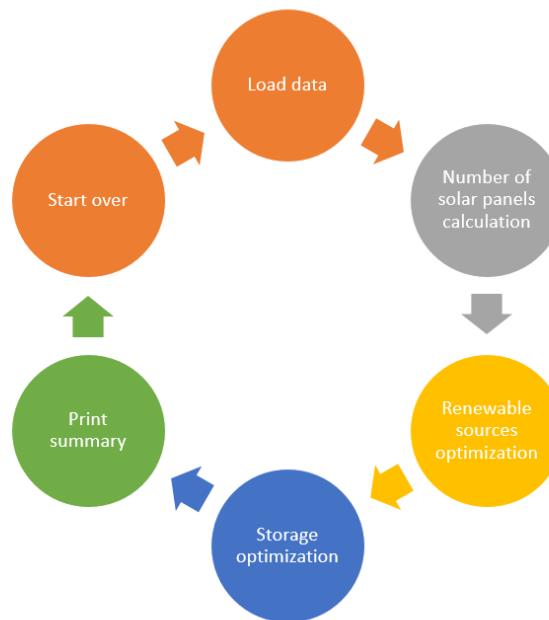
$$0 \leq S_i \leq P_{Storage}(t); \sum_i S_i = P_{Storage}(t)$$

- אם אנו טוענים את מאגרי האנרגיה – נספר בכמה מקורות אנו משתמשים ונטען את כולם באותו הatzב. ככלומר :

$$S_i(t) = \frac{P_{Storage}(t)}{\text{Number of storage sources}}$$

- אם לא משתמשים במאגרי האנרגיה ואין צורך בטעינה שלהם – לא נשמש גם באף מאגר ספציפי.

לסיכום, התהליך מתואר בתרשימים הזורימה הבא :



איור 16 : תרשימים זורימה המתאר את תהליך האופטימיזציה

פרק 5 תוצאות

כמאנר מידע, השתמשנו במסד נתונים חופשי של משרד האנרגיה האמריקאי הכלול דגימות שעתיות במשך שנה (8760 דגימות שנלקחו בשנת 2004) [2]. בניתוח שלנו לקחנו חמשה בתים חולים באיזורים שונים ברוחבי ארצות הברית: אלסקה, לוס אנג'לס, ניו יורק, סן פרנסיסקו וטקסס. לאחר מכן ניתן לבצע אופטימיזציות על מאגר המידע. את התוצאות נציג עבור טקסט כמפורט בוון. במהלך הרצת התוכנית, נ עבור דרכם של שלבים על מנת שהמשתמש יוכל ללמוד את דרכי הניתוח והשלבים שעברנו על מנת לקבל את האופטימיזציה הסופית:

1. נציג את ניתוח מאגר המידע המקומי.
2. יתקיים ניתוח פשוט של הצריכה. ניתוח זה יתרחש תחת הגבלות מאוד כליליות ולכןו נותן סדר גודל כללי בלבד לתוצאות הסופיות. ניתוח זה מהוווה את האופטימיזציה הכלכלית ביותר וAINO מתחשב כלל בתוני מגז האוויר.
3. אנליזה מורחבת – נבצע אופטימיזציה מדוקית יותר לנתח מאגר המידע שלנו. האופטימיזציה מתבצעת עבור כל שעה בנפרד ותלויה במזג אוויר, בקרבה למאגר מים ובמספר מקורות האנרגיה המתחדשת הנבחנים. ניתן לבצע על יום מסוים בשנה, חודש מסוים בשנה או על כל השנה. מכיוון שהאופטימיזציה זו מתחשבת בתוני מגז האוויר ניתן לנתח את מאגרי המידע בצורה יותר מדוקית.
4. נבצע אופטימיזציה לפי עיקרונו - Energy matching. לפי עיקרונו זה, טיעינת המאגר תתבצע בהירות האפשרית ובקצב המקסימלי הנתון לפי תנאי מגז האוויר. זו האופטימיזציה המרכזית והסופית שלנו. אופטימיזציה זו נותנת את העליונות הכימידוקות ואת מירב הנתונים הסטטיסטיים הרצויים.

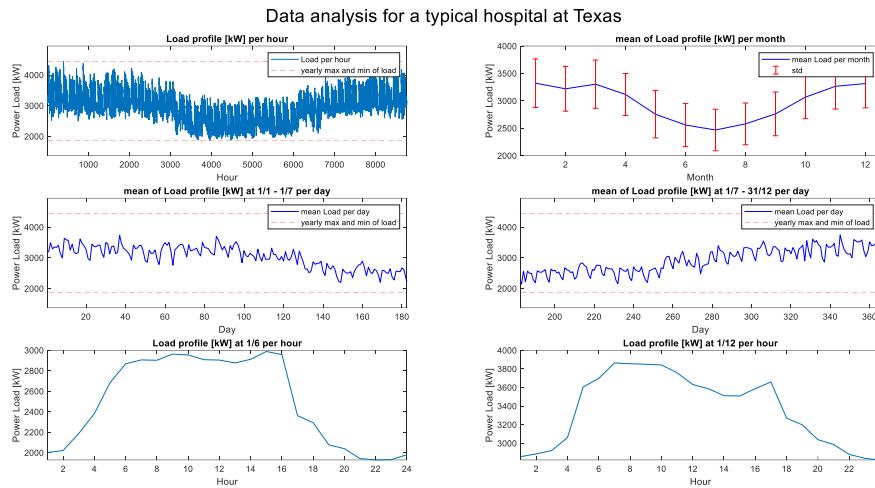
עבור האופטימיזציות: נבצע תחת הנחה כי המקומות לא משתמשים במקור האנרגיה החידרוALKטרוי ואת מכיוון שהוא מקרה זוכות העובדה כי מקור אנרגיה זה מאודאמין וריצוף ולכן נעדיף להשתמש בו אם הוא קיים (מבחינה כלכלית – הוא יקר להקמה לנו עדיף לא להשתמש בו ולכן נצטמצם השימוש בו אך אם הוא כבר קיים אין טעם להשקייע במקור אנרגיה נוסף).

נציג את האנליזה המורחבת ואת האופטימיזציה לפי עיקרונו - Energy Matching ארבעה מקרים: ניתוח שנתי, ניתוח חודשי בדצמבר (חודש טיפוסי בחורף), ניתוח חדשני ביולי (חודש טיפוסי בקיץ) וניתוח יומי ב- 16 בספטמבר (יום אקלמי בשנה). נשים לב לשוני בין הניתוחים מבחינת עלויות סופיות ומערכות מקסימליים של הספק נדרך.

בתת פרק 1, ניתן נתונים צריכת החשמל (בצורה שנתית, יומית ושבועית). בתת פרק 2, נבצע ניתוח פשוט לאור נתונים צריכת החשמל. בתת פרק 3, ניתן את האנליזה המורחבת. בתת פרק 4, ניתן את האופטימיזציה לפי עיקרונו - Energy Matching. לבסוף, בתת פרק 5, נתאר מקרי קצה.

5.1. ניתוח צריכה החשמל

ננתן את נתונים צריכה החשמל מຕוך הנחה כי צריכה החשמל עבור המתקנים הרפואיים (למשל מכשירי הרנטגן, CT ועוד) הינה קבועה לאורך כל השנה. לכן, שינוי צריכה החשמל יבואו עקב שינוי מגז האוויר (אשר דורשים חימום/קירור, בהתאם לטמפרטורת). נסתכל על התרשימים הכללי (איור 17) :



איור 17 : אנוזה של צריכה החשמל בביות החולים טיפוסי בטקסס במשך שנה

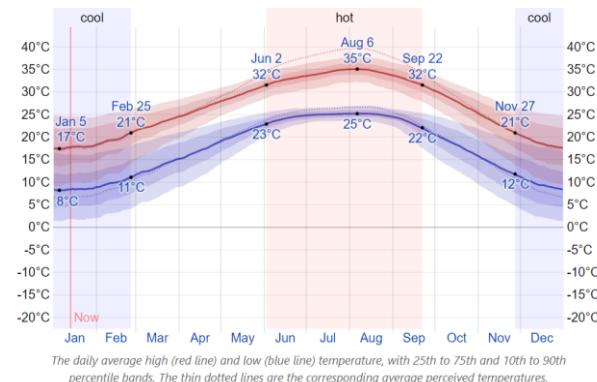
ננתן את הגראפים :

- התרשימים הראשון (הشمالي העליון) מראה את צריכה החשמל השעתית במשך שנה (ב- kWh). נשים לב כי הוספנו לו חסם עליון וחסם תחתון המציגים את ערכי המקסימום והמינימום השנתיים של צריכת החשמל.
- התרשימים השני (הימני העליון) מציג את ממוצע צריכת החשמל החודשי (ב- kWh). נשים לב כי בתרשימים זה הוספנו שורת שגיאות המתארת את סטיית התקן של ממוצע החודשי זה.
- התרשימים השלישי והרביעי (בשורות האמצעית) מציגים את ממוצע צריכת החשמל היומית במשך חצי שנה. כמו בתרשימים הראשון, נשים לב כי הוספנו חסם עליון וחסם תחתון הציגים את ערכי המקסימום והמינימום השנתיים של צריכת החשמל.
- התרשימים האחרון (בשורות התחתונה) מראים כדוגמה את צריכה החשמל השעתית (ב- kWh) ביום טיפוסי בקיץ (1/6) וביום טיפוסי בחורף (12/).

צריכת החשמל השנתית

על מנת להבין את ניתוח נתונים לצריכת החשמל נסתכל על נתונים מזג האוויר:

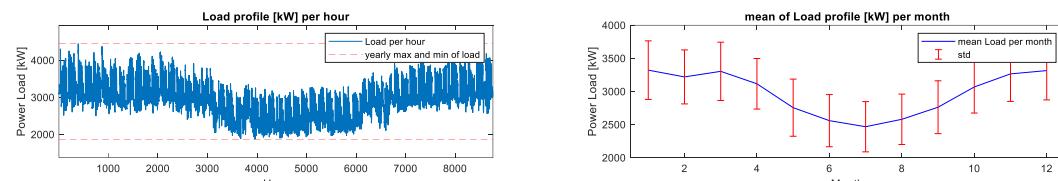
טמפרטורה ממוצעת ביוסטון טקסס [12]:



איור 18 : ממוצע טמפרטורה ביוסטון, טקסס

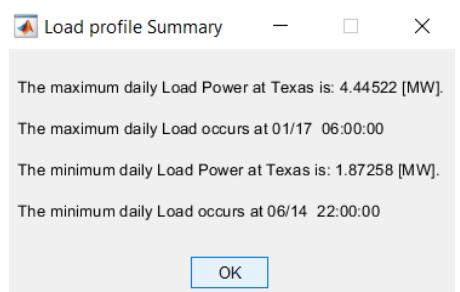
נשים לב כי בחודשי הקיץ הטמפרטורה הממוצעת גבוהה ביום ובלילה נוחה ואילו בחודשי החורף הטמפרטורה הממוצעת נמוכה יותר לנדרש חיים. לכן, נῆפה כי בחודשי הקיץ צריכת החשמל תהיה נמוכה יותר מבחרף.

נשים לב כי עונת הקיץ מתרכחת בין חודש Mai לחדש ספטמבר. יתר על כן, נשים לב שהטמפרטורה הממוצעת בתאריכים אלה נוחה יחסית לכן, נῆפה כי הממוצע החודשי של צריכת החשמל בבית החולים ירד בתאריכים אלה. נשים לב כי זה מתקיים בתרשים המתאר את הממוצע החודשי (איור 19):

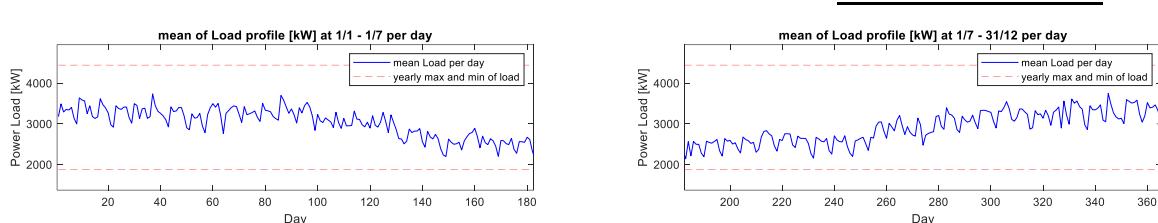


איור 19 : פרופיל צריכת החשמל השנתית בטקסס בשנה

נשים לב (איור 20) כי כמו שציפינו, צריכת החשמל המקסימלית תהיה ב- 17 ביינואר בשעה 00:00 (שיא החורף). הדבר הגיוני מכיוון שבית החולים דרוש חיים בתאריך זה. בשעה זו ניתן להניח כי מספר הבדיקות מתחילה לעלות והעומס על בית החולים מתחילה לעלות שכן נῆפה לצריכה מקסימלית. בנוסף, הצריכה המינימלית תהיה ב- 14 ליוני בשעה 00:00 (שיא הקיץ). הדבר הגיוני מכיוון שלפי ממוצעי הטמפרטורות לעיל, ניתן להניח כי בשעה זו בית החולים דרוש פחות מיזוג אוויר עקב מזג האוויר הנוח. בנוסף, ניתן להניח כי העומס על בית החולים פוחת בשעה זו.



איור 20 : ערכי מקסימום ומינימום של צריכת החשמל בטקסס בשנה

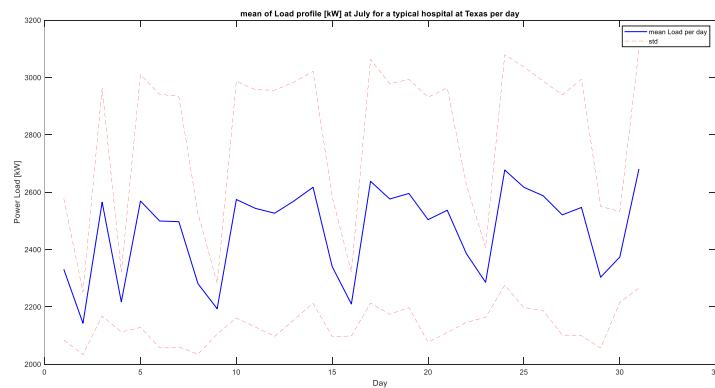


איור 21 : פרופיל צריכה החשמל הממוצעת עבור כל יום בטקסס במשך שנה

ניתן לראות באיור 21 כי ישנה מחזוריות שבועית בצריכת החשמל. לקרהת סוף השבוע ישנה ירידת חדה בצריכה. הדבר הגיוני מתוך ההנחה כי בסוף השבוע רמת הפעולות יורדת (פחות אנשי צוות מאיישים את המחלקות, פחות בדיקות במכשורים וכו'). צורכי חשמל גבוהים וכדו).

ננתן שני חודשים – חודש טיפוסי בחורף וחודש טיפוסי בקיץ.

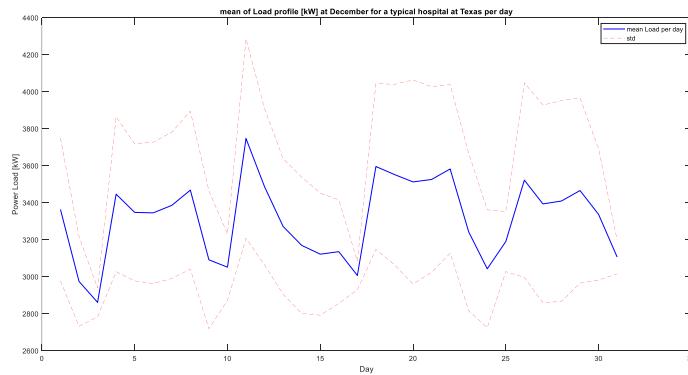
עבור يولיא :



איור 22 : צריכת החשמל הממוצעת עבור כל יום בטקסס בחודש يولיא

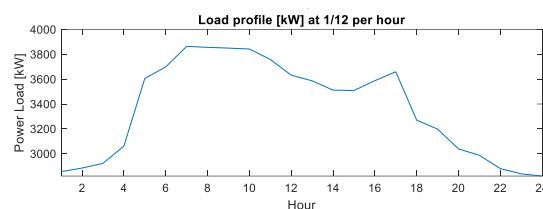
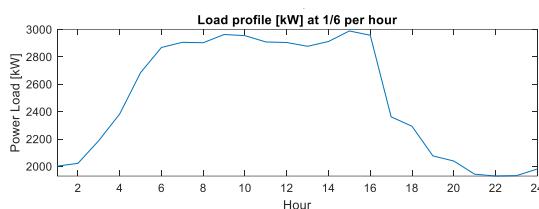
ניתן לראות באיור 22 בבירור את מחזוריות צריכת החשמל במהלך השבוע. בנוסף, ניתן לראות כי יש אונומליה ברבייעי ביולי. במקרה, יום הינו יום העצמאות האמריקאי, לכן ניתן לצפות שבית החולים יעבד במתכונת דומה לסוף השבוע (כלומר, תהיה ירידת בצריכה).

עבור דצמבר :



איור 23 : צריכת החשמל הממוצעת עבור כל יום בטקסס בחודש דצמבר

בדומה לנימוח הקודם, באיור 23 ניתן לראות את מחזוריות צריכת החשמל במהלך השבוע. כפי שהסבירנו קודם, בקייז הצריכה נמוכה יותר מבחורף. ניתן לראות זאת גם בגרפים לעיל – השיאים כתע גבוהים יותר מהשיאים ביולי.



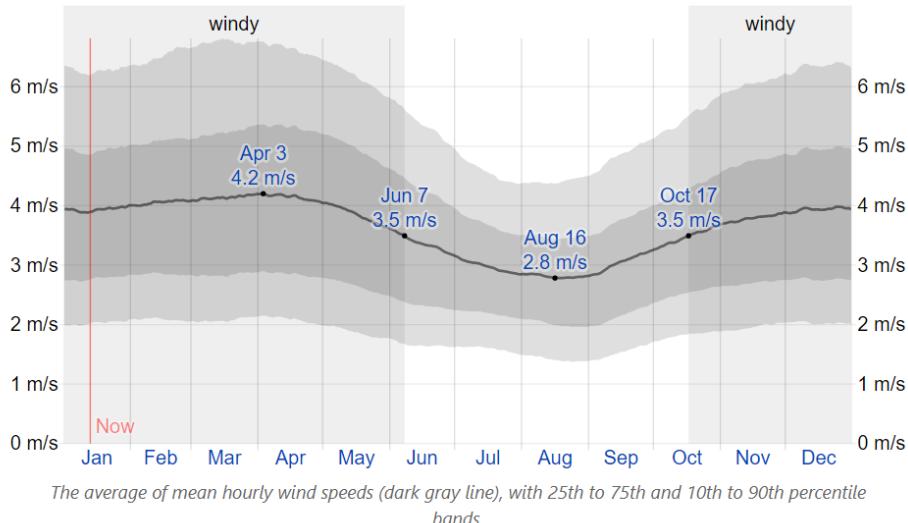
אייר 24 : צריכת החשמל השנתית בטקסס ביום טיפוסי בחורף (1/12) וביום טיפוסי בקיץ (1/7)

נשים לב באирור 24 כי בתחילת כל יום (איזור השעה 6 בבוקר), צריכת החשמל עולה ומתחלפת להתייצב על ערך מסוים. הדבר הגיוני מכיוון שהערכתו, החל משעה זו ישנים יותר בדיקות, וכן המישור הרפואי (אשר מהווה את רוב צריכת החשמל בבית החולים) יתחיל לעבוד – דבר אשר יעלה את צריכת החשמל.

בנוסף, נשים לב למחריות יוונית – בשעות הלילה המאוחרות צריכת החשמל יורדת משמעותית. הדבר הגיוני מכיוון שבאופן טבעי, בלילה רמת הפעילות בבית החולים תרד בשעות אלה (בוחן בני האדם ישנים – דבר הגורר פחות פציעניים לטיפול בהם ופחות רפואיים מטופלים). הדבר מסתדר גם עם שיאי הצריכה (מקסימום ומינימום). כפי שראינו מינימום הצריכה מתרחש בשעות הערב ואילו מקסימום הצריכה מתרחש בשעות הבוקר המוקדמות.

יכולות השימוש במקורות המתחדשים

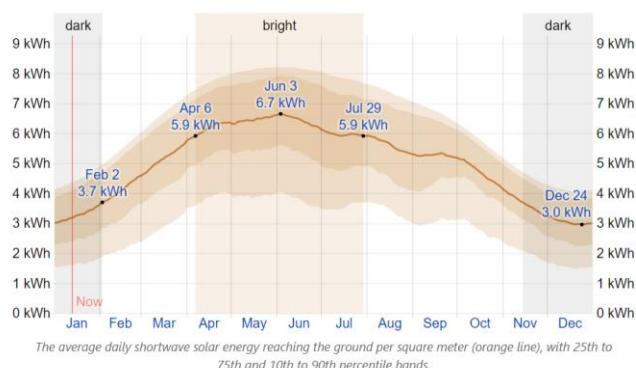
מהירות הרוח [12] :



אייר 25 : מהירות הדוח הממוצעת במשך שנה בויוסטון, טקסס

נשים לב באирור 25 כי המהירות הממוצעת לאורך כל חודשים השנה הינה קטנה מ- $\frac{m}{s} 6$ ולכן לא נצפה לשימוש גבוה בטורבינות הרוח (טורבינות רוח מסולגות לספק חשמל בנזילות טוביה מעל מהירות של $\frac{m}{s} 6$).

קרינה [12]

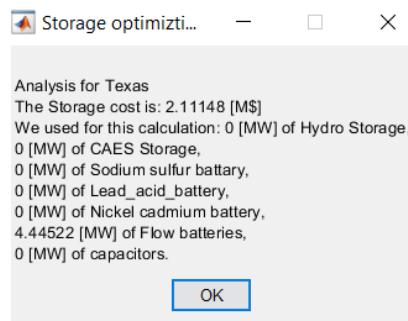


איור 26 : אנרגיית קרינה הסולארית הממוצעת ביוסטונ, טקסס

נשים לב באיוור 26 כי בחודשי הקיץ ישנה קרינה חזקה יותר ולבן נצפה לשימוש נרחב יותר באנרגיה סולארית במיקום זה.

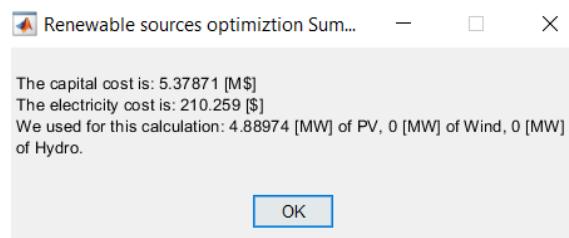
5.2. ניתוח פשוטי

nbצע ניתוח פשוטי של מאגר המידע עבור טקסס. נצפה כי המערכת תבחר את מקור האגירה האנרגיה הזול ביותר – Flow batteries. נצפה כי מקור האגירה יכול את האנרגיה המksamילית הנדרשת במערכת. لكن האופטימיזציה עבור מקורות האגירה תיראה כך (איור 27) :



איור 27 : חלונית סיכום עבור מאגרי האנרגיה בניתוח הפשוטי

בנוסף, לפי ניתוח מזג האוויר לעיל, נצפה כי המערכת תבחר באנרגיה הסולארית כאנרגיה המועדף. המערכת תיקח טווח ביטחון של 10% בצריכת החשמל הדרושה. لكن האופטימיזציה עבור המקורות המתחדשים תיתן את התוצאות הבאות (איור 28) :



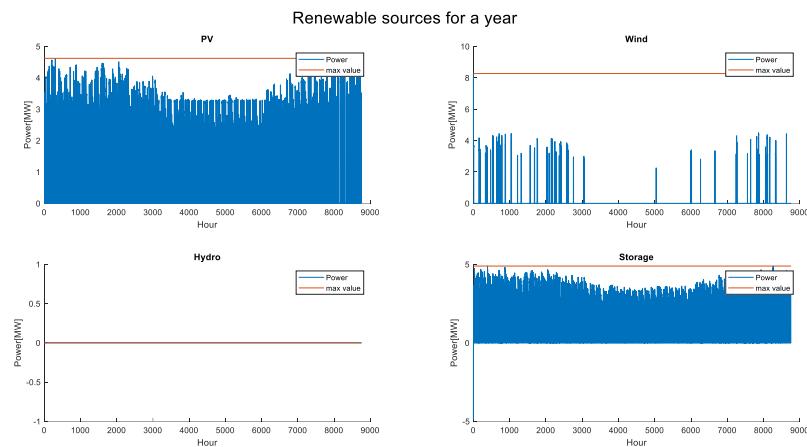
איור 28 : חלונית סיכום עבור מקורות האנרגיה המתחדשים בניתוח הפשוטי

תוצאות אלה מהוות הערכה גסה של המקורות ואינן משקפות את המצב האמיתי. המערכת במצב זה אינה מתחשבת בתנאי מזג האוויר או בשינוי השעתי או העוני של צריכה האנרגיה.

5.5. אנליזה מורחבת

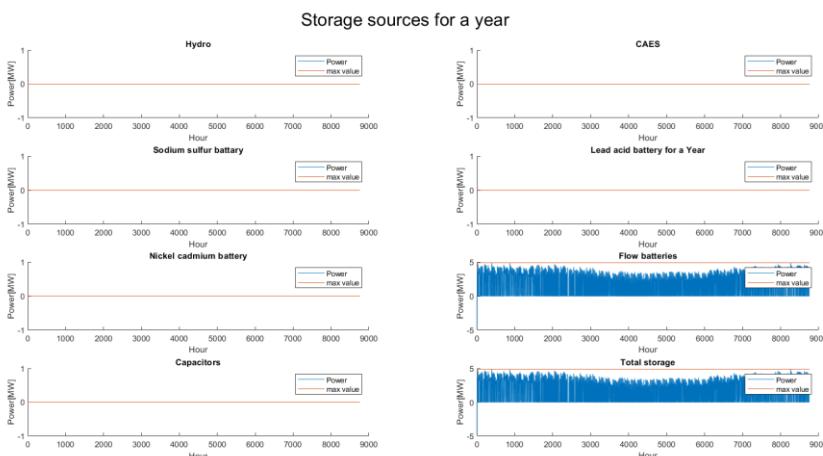
עתה נבצע אනליזה מורחבת אשר תשקף את התוצאות בצורה יותר מציאותית.

ניתוח שנתי



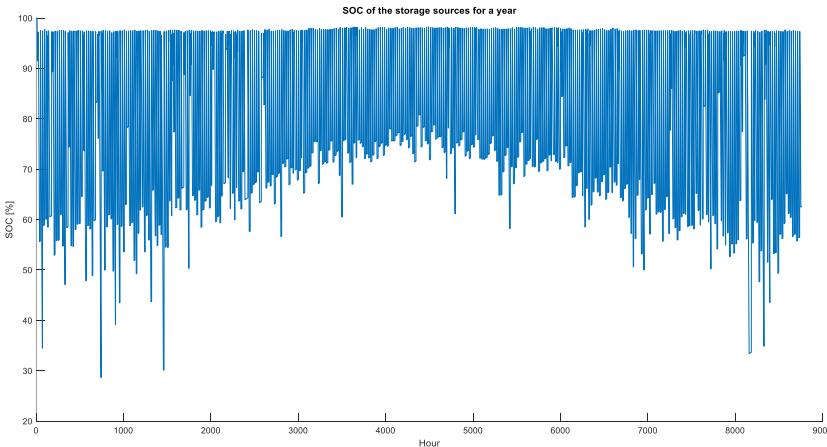
איור 29 : אනליזה מורחבת – סיכום השימוש במקורות האנרגיה במשך שנה

נשים לב באIOR 29 כי לאורך כל השנה, כדאי להשתמש במקור האנרגיה הסולארי, כפי שציפינו. בנוסף, ניתן לראות כי ישן שעות בהן ניתן להשתמש ברוח וניקח אותו כמקור אנרגיה מתARIABLE משני. נשים לב ששבועות אלה מתרחשות בעיקר בחורף (כפי שראינו בגרף המતאר את מהירות הרוח, ממוצע המהירות יותר קרוב למהירות הסף בחודשים אלה). בשאר השעות נשתמש באגירת האנרגיה (במידה ואין מספיק קרינה או אין מספיק רוח על מנת להשתמש במקורות אלה).



איור 30 : אනליזה מורחבת – סיכום השימוש במאגני האנרגיה במשך שנה

כפי שהסבירנו בתפקיד הקודם, נצפה כי המערכת תבחר את מקור אגירת האנרגיה הזול ביותר – Flow batteries. ניתן לראות זאת באIOR 30. נשים לב כי המערכת עוקבת אחרי האגירה הכללית ואנייה לוקחת שום מקום אחר. זה קורה גם עבור שאר הניטוחים لكن בהמשך לא נראה את גוף זה.

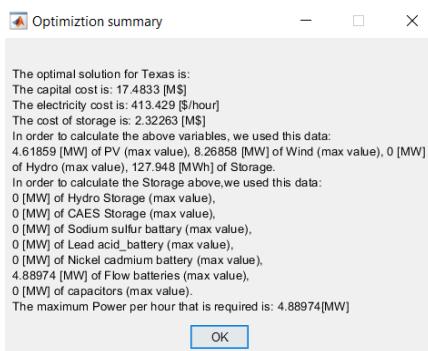


אייר 31 : אנליה מוחבנת – SOC במשך שנה

אייר 31 מתאר את מצב הטעינה עבור מקורות האנרגיה. נשים לב כי ישנו שימוש יותר קטן במקורות האגירה בקץ (כפי שציפינו עקב תנאי מזג האוויר).

בנוסף, נשים לב כי SOC אינם מתאפס. הדבר נובע מהחישובים הפנימיים של ה- SOC גודל המאגר (מבחינת הגדרתו במהלך החישוב). הדבר מתוקן בהמשך באופטימיזציה לפי עיקרונו ה- Energy Matching.

סיכום (אייר 32) :



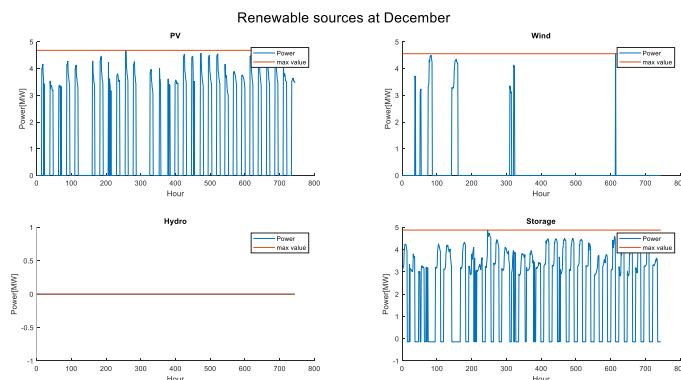
אייר 32 : אנליה מוחבנת – חלונית סיכום המשאבים הדודים והעלויות במשך שנה

לסיכום, קיבלנו עלויות יותר מציאותיות. השיאים דומים (עד כדי מרוחך הביטחון שלנו).

בנוסף, ניתן לראות כי ישנו הבדל משמעותי בעלות אך אלו נמצאים באותו סדר גודל של עלויות.

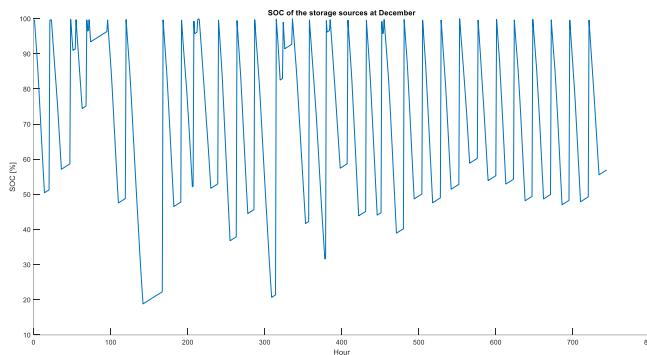
כיתות חודשי

גייטוח חודשי עבור דצמבר :



אייר 33 : א溺זה מורחבת – סיכון השימוש במקורות האנרגיה בחודש דצמבר

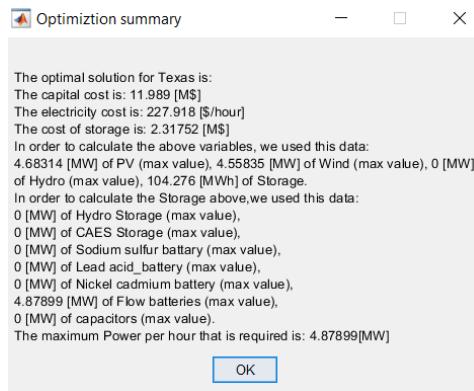
ניתן לראות באירור 33 כי עברו חודש טיפוסי בחורף ישנו שימוש בפאנלים סולאריים. ניתן לראות אונומליות בהם משתמשים בטורבינות הרוח על מנת לספק אנרגיה. לפי ניתוח מגדר האוויר שבירצענו לעיל הדבר מתיישר עם הנתונים.



איור 34: אנויזה מוגברת – SOC בחודש דצמבר

ניתן לראות באירוע 34 כי עבר חודש טיפוסי בחורף anno נשתמש ביותר אנרגיה ממוקורות האגירה עקב הקירינה היותר נמוכה בחודשים אלה ולכן מיצוי יותר נזוק של הפאנלים חסולאים.

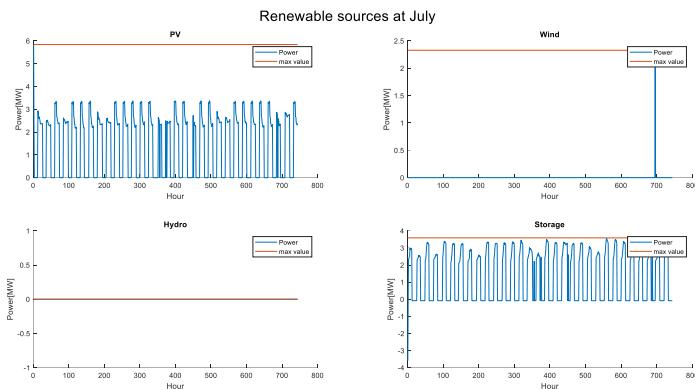
סיכום (אייר 35):



איור 35 : אגוזה מורחבת – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות בחודש דצמבר

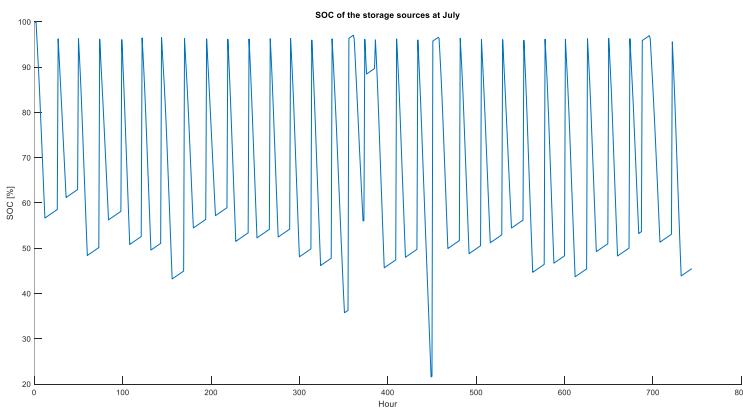
נשימים לב כי קיבלנו עלויות דומות לעליות השנתיות. ההפרש בעליות נובע מהשימוש היוטר במנוח באנרגיית הרוח.

עבור חודש יולי:



איור 36 : אנליה מוחשבת – סיכום השימוש במקורות האנרגיה בחודש יולי

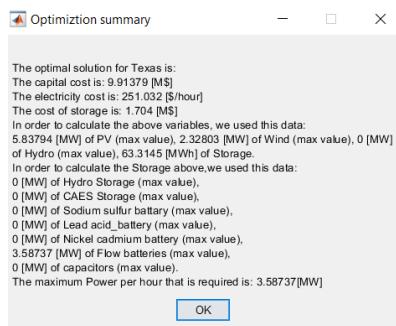
ניתן לראות באיור 36 כי עבור חודש טיפוסי בקייז ישנו שימוש בפאנלים סולאריים. ניתן לראות אונומליות בהם משתמשים בטורבינות הרוח על מנת לספק אנרגיה אך השימוש העיקרי יהיה בפאנלים סולאריים. לפיכך ניתן מזג האוויר שביצעו לעיל הדבר מתиישר עם הנתונים.



איור 37 : אנליה מוחשבת – SOC בחודש יולי

ניתן לראות באיור 37 כי עבור חודש טיפוסי בקייז אנו משתמש באנרגיה ממוקורות האגירה לחורף פחות זמן מבחרף עקב הקרןינה היוטר גבואה בחודשים אלה ולכן מיצוי יותר טוב של הפאנלים הסולאריים והעדפתם על שימוש במקורות האגירה (עקב ההפרש במחיר).

סיכום (איור 38):

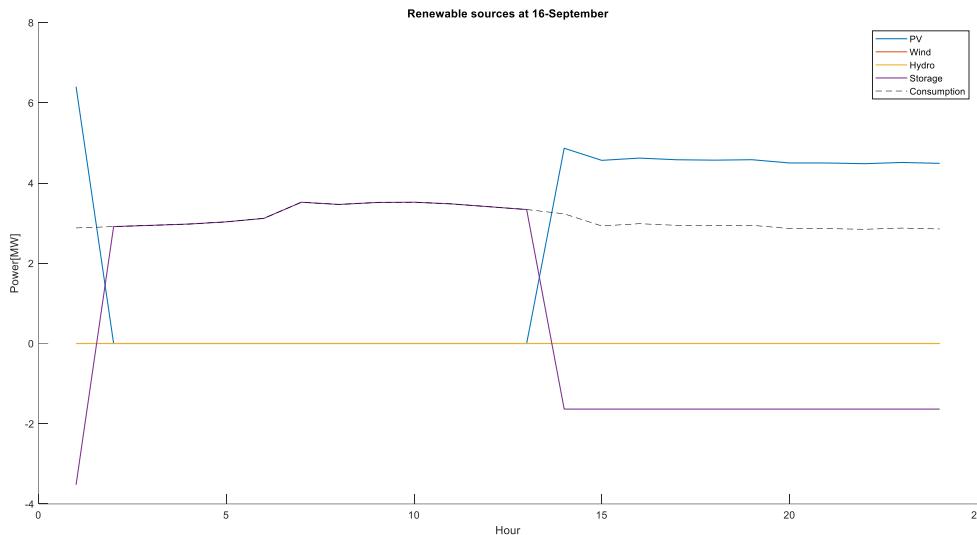


איור 38 : אנליה מוחשבת – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות בחודש יולי

נשים לב כי קיבלנו עלויות יותר נמוכות מהעלויות השנתיות. ההפרש בעליות נובע מהשימוש היוטר הנמוך באנרגיית האגירה ובאנרגיית הרוח.

ניתוח יומי

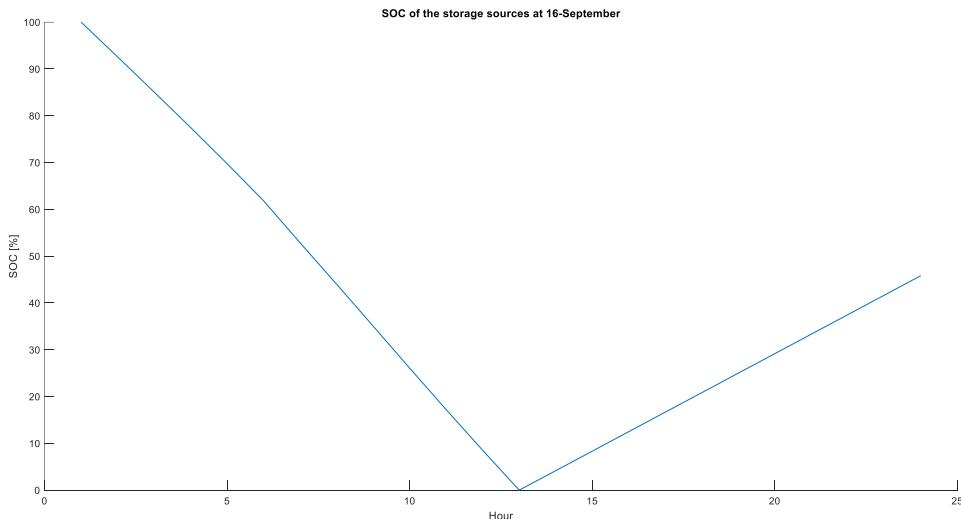
נתנו עבור יום ספציפי – בתאריך 16 לסתמבר :



איור 39 : אנליה מוחשבת – סיכון השימוש במקורות האנרגיה ב- 16/9

נשים לב באירור 39 כי כאשר אנו משתמשים באנרגיית האגירה אנו ננצל בדיקות את האנרגיה הדורישה בבית החולמים. זאת על מנת לא ליצור עודפים שיתבצעו. בנוסף, כדאי להשתמש באנרגיה סולארית בשעות הרלוונטיות לספק את האנרגיה הדורישה בבית החולמים. בנוסף, בשעות השימוש נטעין את מאגר האגירה לשימוש הבא. לכן מצב הטעינה של מאגר האנרגיה

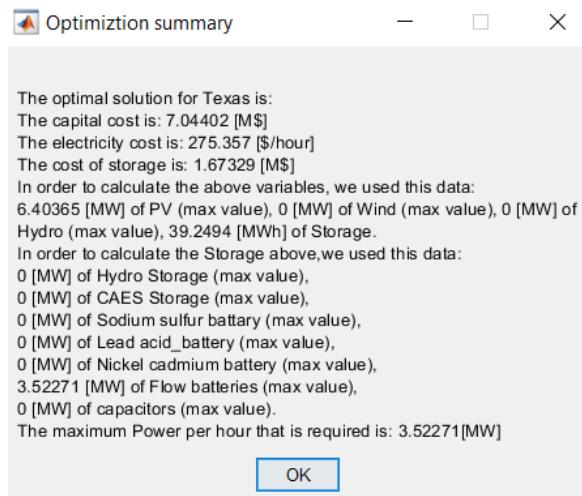
יראה כך :



איור 40 : אנליה מוחשבת – SOC ב- 16/9

נשים לב באירור 40 כי אנו ממצאים את כל מאגר האנרגיה במהלך היום.

סיכום (איור 41) :



איור 41 : א נליזה מוגרחבת – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות ב-

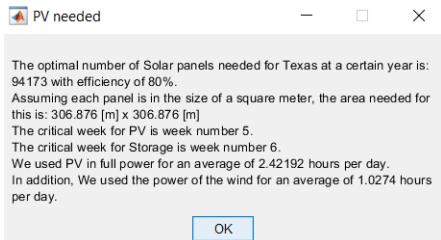
נשים לב כי העליות נמכות יותר מהעלויות השנתיות (והחודשיות) מכיוון שאנו נמצאים ביום טיפוסי ולא ביום בו ישנים שיאים של צריך אנרגיה. לכן האנרגיה אינה גבוהה במיוחד.
ואינה נמוכה במיוחד.

5.4. אופטימיזציה לפי עיקנון ה-Energy Matching

עתה נוכל לבצע את האופטימיזציה המרכזית לפי עיקנון ה-Energy matching. כעת, נתחשב גם בנסיבות הפאנלים הסולאריים ונקבל את מספר הפאנלים הסולאריים הדרוש.

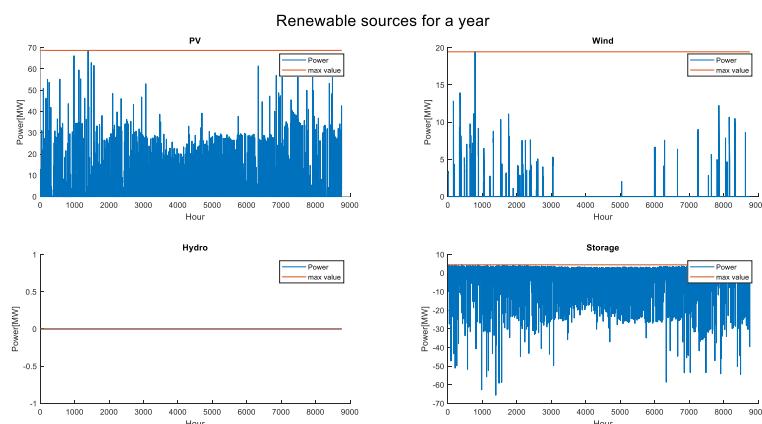
ניתוח שניתי

ראשית נמצא את מספר הפאנלים הדרוש עבור הנזילות הנבחרת. בנוסף, נציג למשתמש (איור 42) גם את השטח הדרוש להקמת חוות הפאנלים.



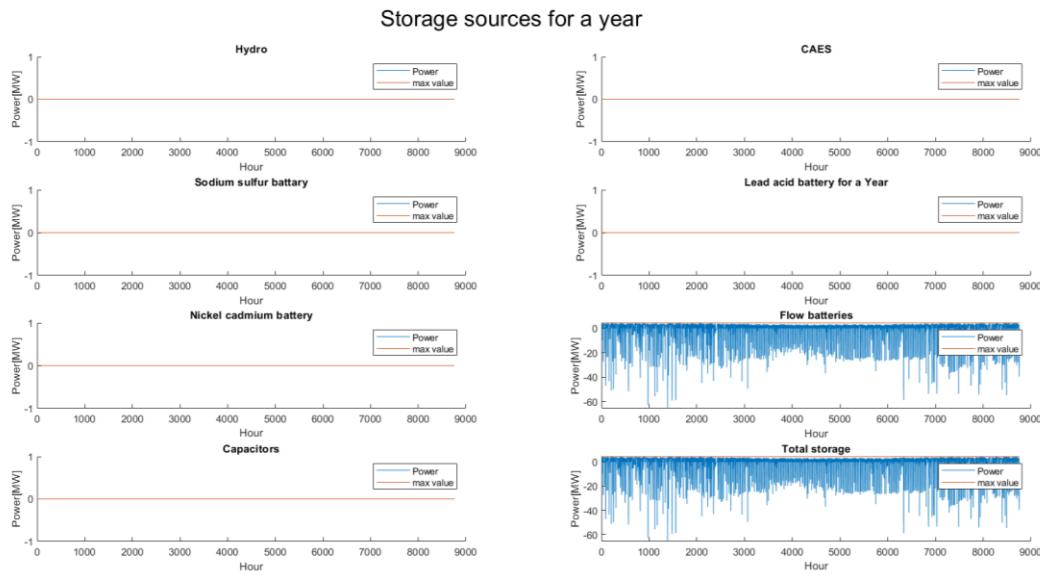
איור 42 : מספור הפאנלים הדרוש וurface קרייטיים במהלך שנה – Energy Matching

נשים לב באיור 42 כי השבוע הקרייטי (השבוע שלפניו נקבע את גודל המאגר או את מספר הפאנלים הדרוש) עבור הפאנלים הוא השבוע החמישי ועבור אגירת האנרגיה הוא השבוע השישי. בנוסף נשים לב כי ב ממוצע נשתמש בכל הפאנלים הסולאריים בשיא תפוקתם למשך 2.42 שעות ביום וברוח למשך 1.03 שעות ביום.



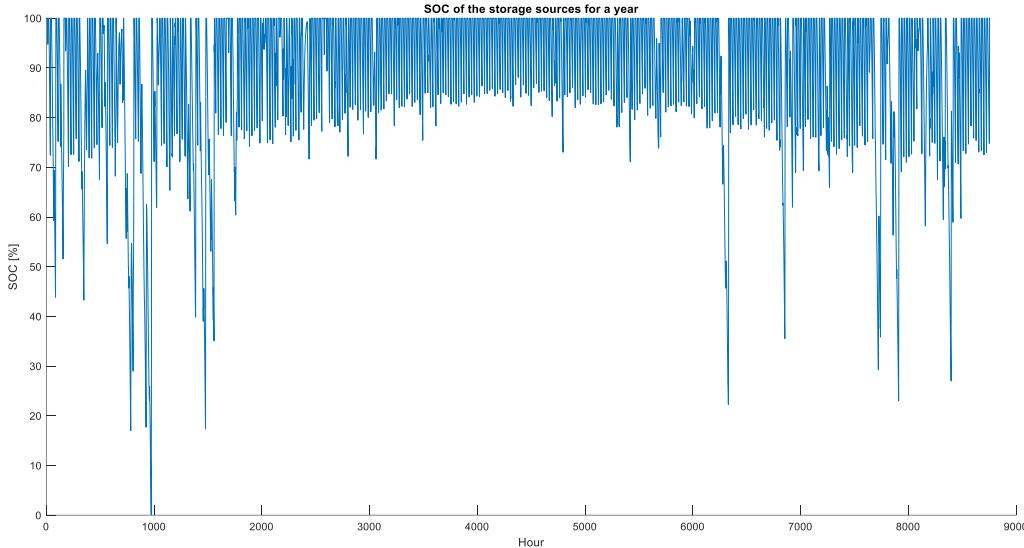
איור 43 – סיכום השימוש במקורות האנרגיה במהלך שנה – Energy Matching

נשים לב באיור 43 כי עיקר השימוש באנרגיה מתחדשת הוא בעזרת אנרגיה סולארית. ישן שעות בהן ניתן להשתמש ברוח ולא ניתן להשתמש באנרגיה סולארית (או שאנרגיה זו אינה מספקת) וכן נשתמש באנרגיית הרוח. בנוסף נשתמש במקורות אגירת אנרגיה. נשים לב כי השימוש במקורות האגירה יותר נמוך בחודשי בקיץ כפי שנוכל לצפות.



איור 44 – סיכום השימוש בממנגי האנרגיה במשך שנה

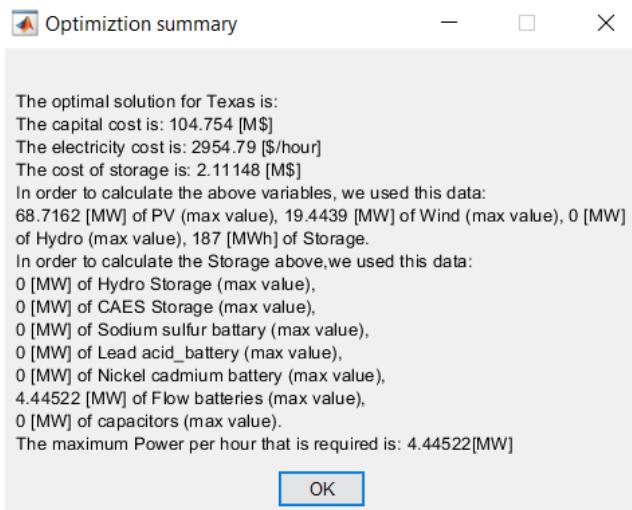
כפי שהסבירנו בתת פרק 5.2, נצפה כי המערכת תבחר את מקור אגירת האנרגיה הזול ביותר ככלומר ב – Flow batteries. בנוסף, נשים לב כי המערכת עוקבת אחרי האגירה הכלכלית ואינה לוקחת משום מקור אחר. זה קורה גם עבור שאר הניטוחים لكن בהמשך לא נראה את גраф זה.



איור 45 – SOC – Energy Matching : 45

איור 45 מותאר את מצב הטעינה עבור מקורות האנרגיה. נשים לב כי ישנו שימוש יותר קטן במקורות האגירה בקי"ץ (כפי שציפינו עקב תנאי מזג האוויר). נשים לב כי הימים הקritosים הם בימי החורף מכיוון שיוכולים להיות ימים בהם לא ניתן להשתמש כלל במקורות האנרגיה המתחדשת (ובפרט באנרגיה הסולארית) لكن נדרש להשתמש ביותר באנרגיה ממוקורות אגירת האנרגיה.

סיכום (איור 46) :



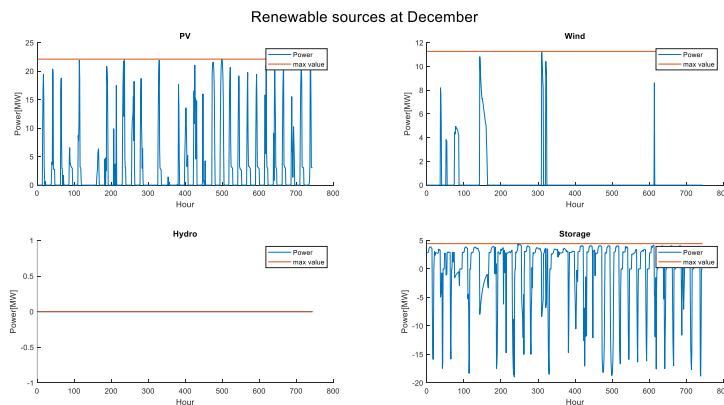
OK

איור 46 – חלונת סיכום המשאבים הדרושים והעלות במהלך שנה *Energy Matching*

זו האופטימיזציה הכי מציאותית שפיתחנו בפרויקטן לכן קיבלונו עלויות יותר מציאותיות. טיענת האנרגיה מתרחשת כשניתן. בנוסף, השיאים עבור אנרגיות הרוח והאנרגיה הסולארית ובוהים משמעותית (עלקב הדרוש בטיענה על מנת להתכוון לבאות) ולכן העלות גבירות יותר.

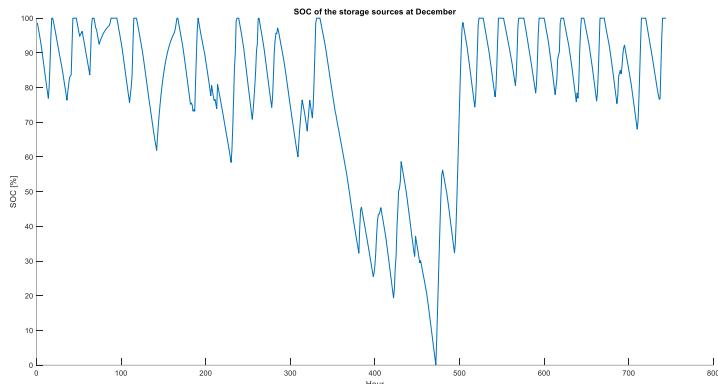
ניתוח חודשי

ניתוח חודשי עבור דצמבר (איור 47) :



אייר 47 – סיכום השימוש במקורות האנרגיה בחודש דצמבר

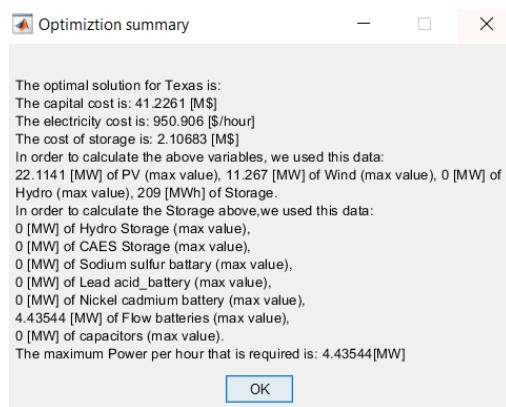
ניתן לראות באיור 47 כי עבור חודש טיפוסי בחורף ישנו שימוש בפאנלים סולאריים. ניתן לראות אונומליות בהם משתמשים בטורבינות הרוח על מנת לספק אנרגיה. לפי ניתוח מזג האוויר שביבינו לעיל הדבר מתиישר עם הנתונים.



אייר 48 – SOC – Energy Matching : 48 בחודש דצמבר

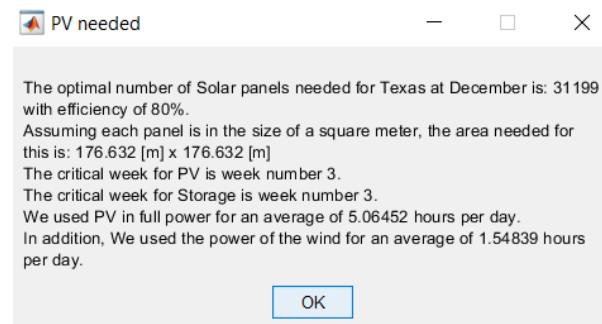
ניתן לראות באיור 48 כי עבור חודש טיפוסי בחורף אנו משתמש ביוטר אנרגיה ממקורות האגירה עקב הקרים היוטר נמוכה בחודשים אלה ולכן מיצוי יותר נמוך של הפאנלים הסולאריים. בנוסף, ניתן לראות כי הטעינה נמוכה באמצעות החודש – זאת מכיוון שתנאי מזג האוויר לא מאפשרו טעינה מספקת.

סיכום (איור 49) :



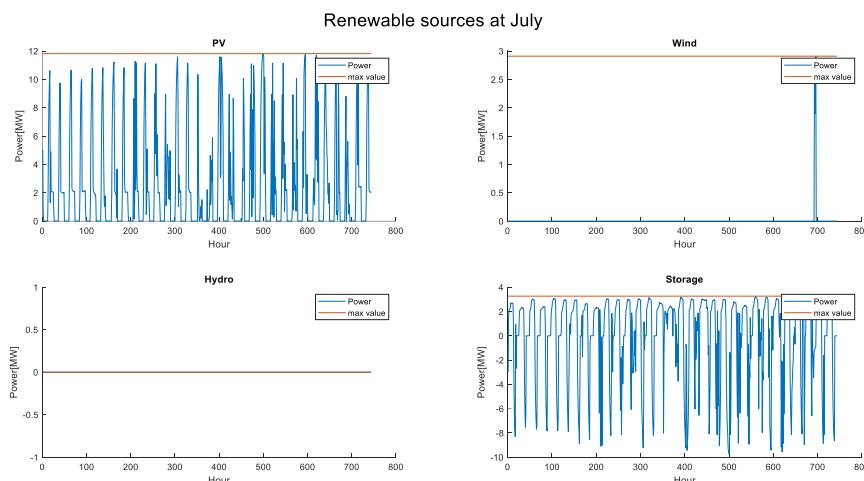
אייר 49 – חלונית סיכום המשאבים הדודים והעלויות בחודש דצמבר

נשים לב כי קיבלנו כחצי מהעלויות השנתיות. ההפרש בעלות נובע מהשימוש היותר נמוך באנרגיית הרוח ובאנרגיית הסולארית.



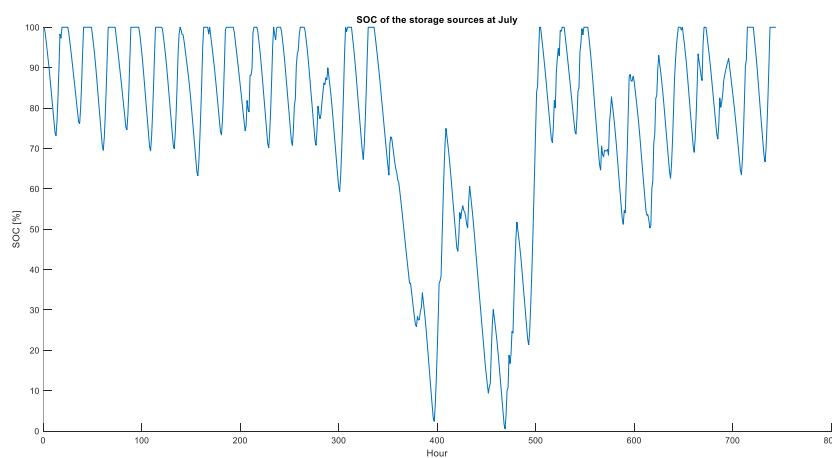
איור 50 – מספר הפאנלים הדרוש ומערכות קריטיים בחודש דצמבר

בנוסף, ניתן לראות באיור 50 כי מספר הפאנלים קטן עקב אי המציאותות תנאי קיצוניים בחודש זה.
עבור חודש יולי:



איור 51 – סיכום השימוש במקורות האנרגיה בחודש יולי

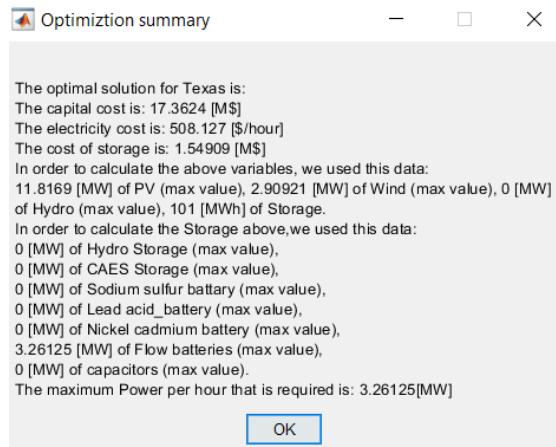
ניתן לראות באיור 51 כי עבור חודש טיפוסי בקיין ישנו שימוש בפאנלים סולאריים. ניתן לראות אונומליות בהם משתמשים בטורבינות הרוח על מנת לספק אנרגיה אך השימוש העיקרי יהיה בפאנלים סולאריים. לפיכך מוג האוויר שביצעו לעיל הדבר מתиישר עם הנתונים.



איור 52 – SOC – Energy Matching : 52 בחודש יולי

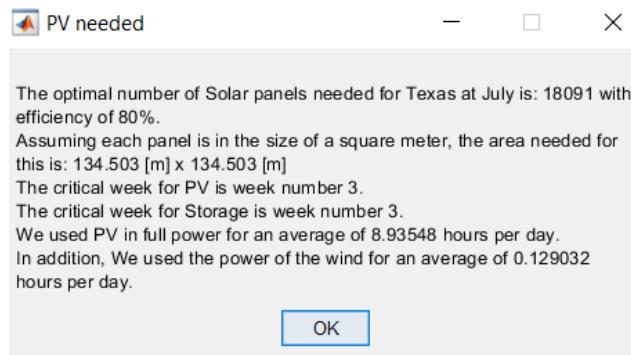
ניתן לראות באיור 52 כי עבור חודש טיפוסי בקי' אנו משתמש באנרגיה ממקורות האגירה לאורך פחות זמן מבחרות עקב הкриינה היותר גבואה בחודשים אלה ולכן מיצוי יותר טוב של הפאנלים הסולאריים והעדפתם על שימוש במקורות האגירה (עקב ההפרש במחיר).

סיכום (אייר 53):



אייר 53 – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות בחודש יולי

נשים לב באיור 53 כי קיבלנו עלויות משמעותית יותר נמוכות מהעלויות השנתיות. ההפרש בעליות נובע מהשימוש היותר נמוך באנרגיית האגירה ובאנרגיות הרוח ובאנרגיה הסולארית עקב הצורך היותר נמוכה הדורשה.

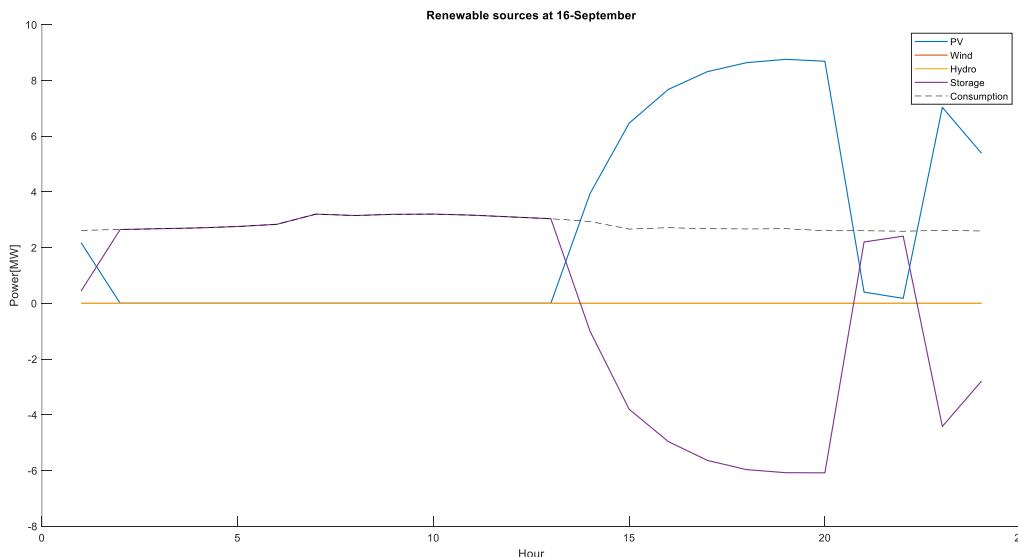


אייר 54 – מספר הפאנלים הדרוש ועריכים קרייטיים בחודש יולי

בנוסף, לפי אייר 54, מספר הפאנלים קטן עקב אי המזאות תנאים קיצוניים בחודש זה והשימוש הנמוך יותר באנרגיה.

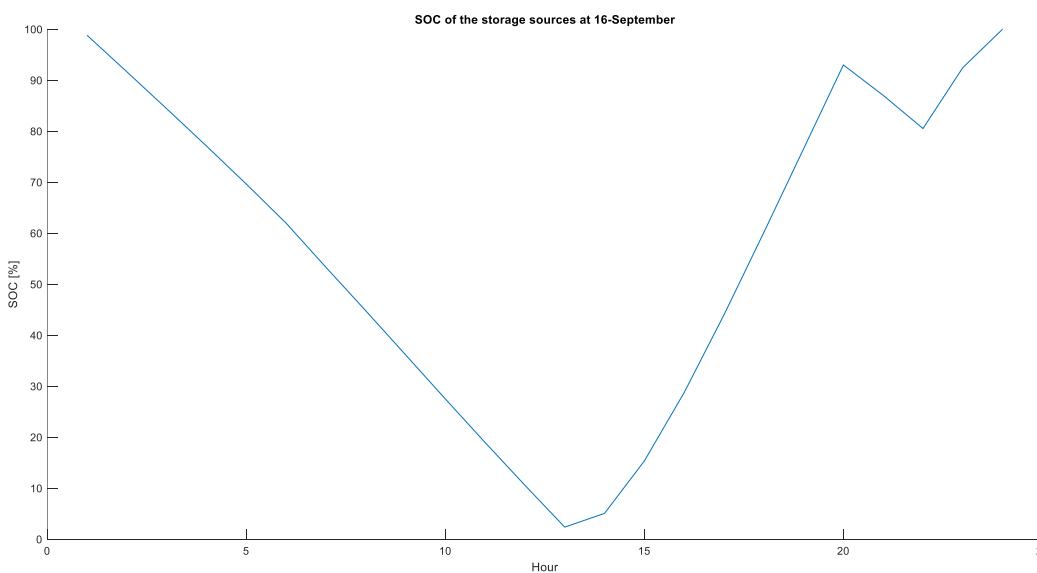
ניתוח יומי

נתוח עבור יום ספציפי – בתאריך 16 בספטמבר :



איור 55 : Energy Matching – סיכום השימוש במקורות האנרגיה ב- 16/9

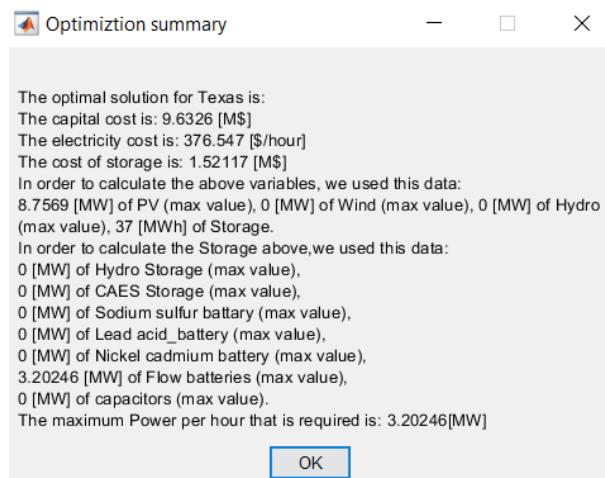
נשים לב באיוור 55 כי כאשר אנו משתמשים באנרגיית האגירה אנו ננצל בדיקות את האנרגיה הדרישה בבית החולמים. זאת על מנת לא ליצור עודפים שיתובזו. בנוסף, נעדייף להשתמש באנרגיה סולארית בשעות הרלוונטיות לספק את האנרגיה הדרישה בבית החולמים. בנוסף, בשעות השימוש נתעין את מאגר האגירה לשימוש הבא. נשים לב כי ישן שעותם כמותה הק裏ינה אינה מספקת לשימוש רציף בפאנלים הסולאריים لكن נשלים את הצורך בעזרת אנרגיית האגירה. لكن מצב הטעינה של מאגר האנרגיה יראה כך (איור 56) :



איור 56 : Energy Matching – SOC

נשים לב באיוור 56 כי אנו ממצאים את כל מאגר האנרגיה במהלך היום. בנוסף, נשים לב כי אנו מתחילהים את היום במצב של טעינה מלאה ומסיימים אותו באותו מצב.

סיכום (איור 57):

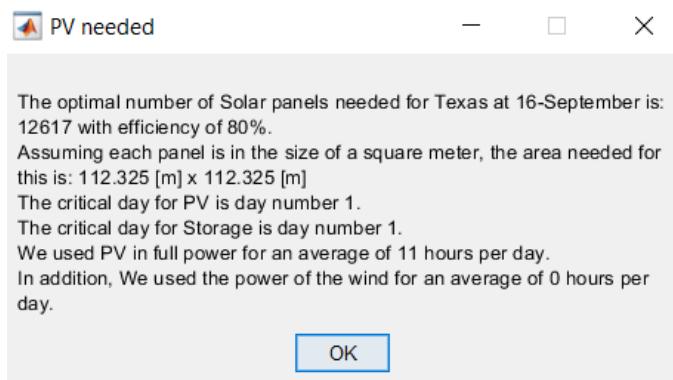


איור 57 – חלונית סיכום המשאבים הדרושים והעלויות ב- 16/9 – Energy Matching :

נשים לב כי ה

עלויות נמוכות יותר מה

עלויות השנתיות (והחודשיות) מכיוון
שאנו נמצאים ביום טיפוסי ולא ביום בו ישנים שיאים של צריך אנרגיה. לכן האנרגיה אינה גובהה במיוחד וaina נמוכה במיוחד. בנוסף נשים לב כי גודל המאגר הדרוש נמוך משמעותית מהצורך השנתי (זאת מכיוון שלא לצרכים "לחפות" על ימים בהם אין שימוש באנרגיות אחרות).



איור 58 – מספר הפאנלים הדרושים וערכים קרייטיים ב- 16/9 – Energy Matching :

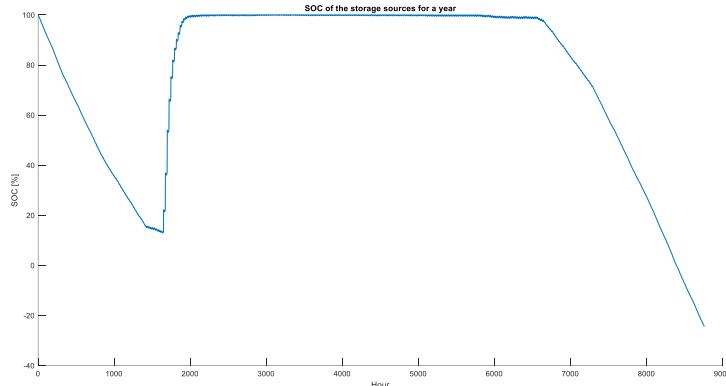
נשים לב באיור 58 כי מספר הפאנלים הדרוש נמוך משאר הנитוחים זאת עקב הצורך להגעה לשיא יותר נמוך של אנרגיה.

5.5. מקרי קצה

ישנם מקרים בהם תנאי מזג האוויר אינם מאפשרים לבצע את האופטימיזציה בהצלחה:

1. ניתן להגיע במצב בו ה-SOC שלילי (איור 59). כאשר לא ניתן לטען את מאגר האנרגיה בצורה מספקת ועקב תנאי מזג האוויר נחוץ להשתמש במאגר האנרגיה יותר נוכל להגיע במצב בו מצב הטעינה של הסוללה שלילי – דבר לא פיזיקלי.

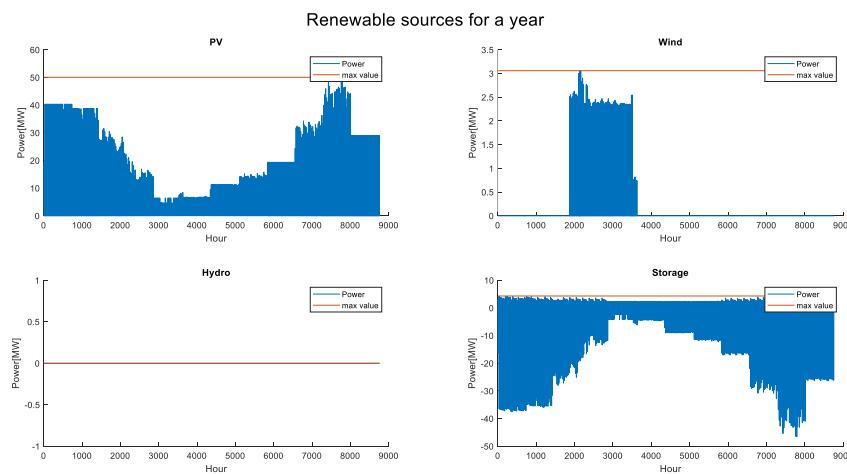
דוגמה לכך יכולה להיות ניתוח שנתי של אלסקה כאשר בחישוב מספר הפאנלים "נחליק" את המידוע לפי 365 יום:



איור 59 : מקרה קצה – SOC מקבל ערכים שליליים

במצב כזה אנו טוענים כי האופטימיזציה עדין נכונה עבור כל השעות בהן ה-SOC חיובי. זאת מכיוון שהאופטימיזציה שלנו לא יכולה להתמודד עם ערכיהם קיצוניים ולטעון בצורה מספקת את מאגר האנרגיה. במקרה כזה, על מנת שנוכל לטען את מאגר האנרגיה בצורה מספקת נדרש להגדיל את מספר הפאנלים הסולאריים במספר עצום ולא פרקטטי או להגדיל את גודל מאגר האנרגיה למספר עצום באותה המידה – דבר שייגרום להתייקרות במחיר ולדרישות שטח לא ישימות.

2. מספר הפאנלים הסולאריים עצום שכן, השטח הדרוש לפרישתם אינם ישים. כאשר לא ניתן לספק את האנרגיה הדורשה לטעינה מאגר האנרגיה ולדרישות בית החולים בצורה מספקת ועקב תנאי מזג האוויר נחוץ להגדיל את מספר הפאנלים הדרושים בצורה משמעותית. דוגמה לכך יכולה להיות ניתוח שנתי של אלסקה (איור 60):

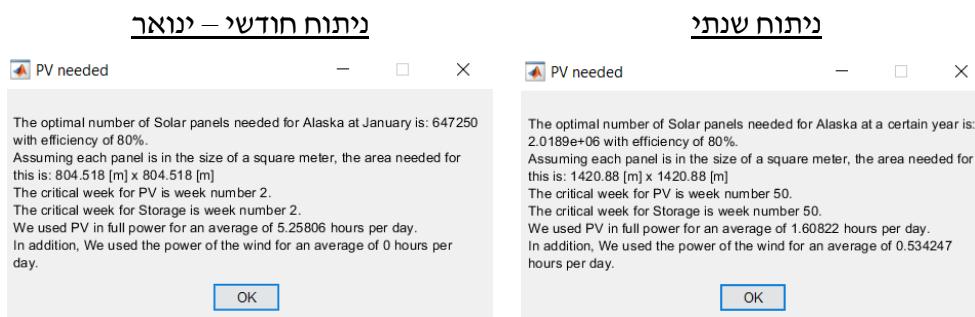


איור 60 : סיכום מקורות האנרגיה באלקה במהלך השנה – Energy Matching

נשים לב באIOR 60 כי השימוש באנליסים סולאריים באיזור טווח השעות 7000-8000 מתקבל שיא דרישת הגבהת משמעותית משאר טווח השעות. בנוסף, ידוע לנו כי מדובר בתקופת החורף לכון הקירינה יותר נמוכה. לכן, אם ניקח מספר פאנלים נמוך יותר (ונפיצה על כך בעזרת שימוש יותר נרחב באנרגיה) נוכל עדין לעמוד בדרישות האנרגיה ולהקטין את השטח הדרוש בצורה משמעותית.

לדוגמה נשווה בין הניתוח השנתי של אלסקה לניתוח עבור חדש ינואר. זהו לא החדש הקרייטי אלא חדש בעל שימוש יותר קטן באנרגיה סולארית (חדש ינואר מיוצג בשעות 1-744 בגרף לעיל). בנוסף, זהו חדש בתקופת החורף לכון הוא מייצג בצורה נאמנה מספר

панלים נמוך יותר :

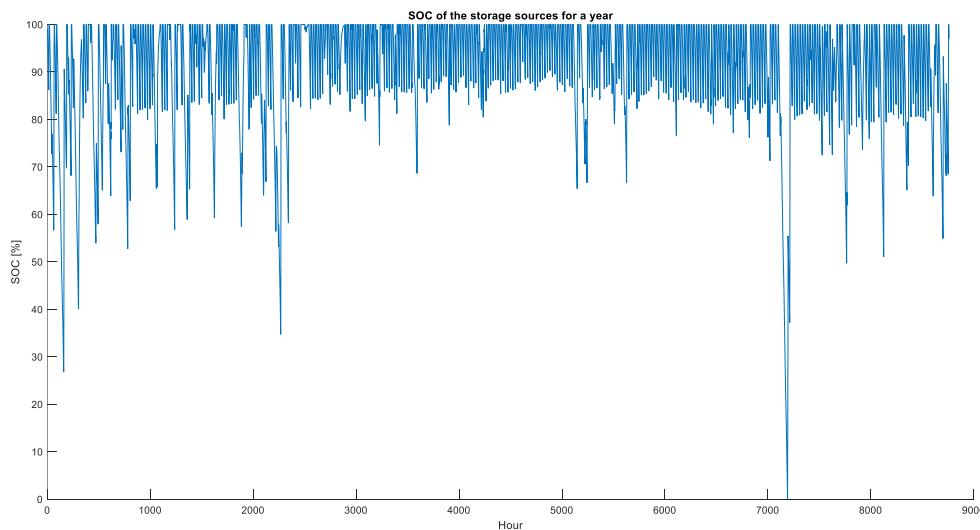


איור 61 – מספר הפאנלים החדש, השטח החדש וערכים קרייטיים עברוניתוח שנתי וניתוח חודשי באלסקה

נשים לב בהשוואה באIOR 61 כי הקטנו את מספר הפאנלים פי 3.12. ניתן להקטין את מספר הפאנלים עוד יותר.

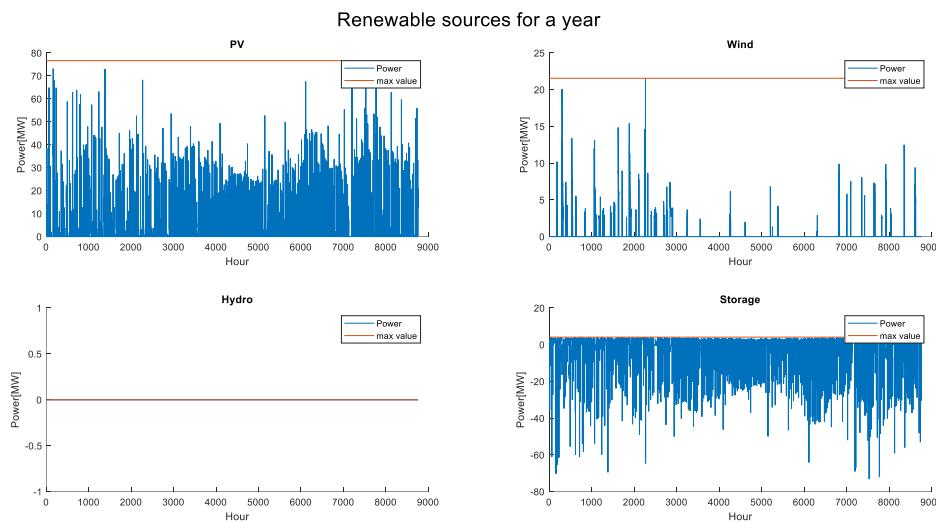
3. גודל מאגר האנרגיה עצום. כאשר לא ניתן לספק את האנרגיה הדרושה לדרישות בית החולים בצורה מספקת ועקב תנאי מג האויר לא נוכל להשתמש במקורות האנרגיה המתחדשים כמעט, נctrיך להגדיל את גודל המאגר החדש בצורה משמעותית – גם אם ברוב הזמן לא נשתמש בו כמעט.

כדוגמה נציג את ניו יורק. מצב הטעינה השנתי של מאגר האנרגיה יראה כך (איור 62) :



איור 62 SOC בניו יורק במהלך השנה

כאשר השימוש במקורות האנרגיה המתחדשת הינו (איור 63) :



איור 63 – סיכום השימוש במקורות האנרגיה בינוי יווק במהלך שנה

לכן נוכל להניח כי אילו היינו מקטינים את גודל המאגר ומגדילים את מספר הפאנלים הסולאריים היינו יכולים לקבל את האנרגיה בצורה יותר עילית.

פרק 6 השוואת מערכת קיימת

בפרקם הקודמים הצגנו שלושה סוגי אופטימיזציות שונים עבור מקורה הבוחן שהציגו (בית חולים בטקסס). בפרק זה נציג השוואת בין סוגי אופטימיזציות אלה. לאחר מכן, נתנו שני מאמריהם המתארים מקרי בוחן של מערכות אנרגיה מתחדשות. מאמריהם אלה מתבססים על אופטימיזציה לפי מודל הנקרא (HOMER) (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables). לבסוף, נבצע השוואת בין ניתוח העלות של פרויקט זה לבין מקרי הבוחן.

השוואת סוגי האופטימיזציות השונים

נתחיל מהשוואת האופטימיזציות שלנו. מלא את הטבלה לפי איורים 27, 28 (ניתוח פשטני), איור 32 (ניתוח מורחב במהלך שנה), ואיור 46 (Energy Matching) במהלך במהלך שנה) :

ENERGY MATCHING	אנליזה מורחבת	ניתוח פשטני				
104.754	17.4833	5.37871	Capital cost [M\$]			
2954.79	413.429	210.259	Electricity cost [\\$]			
68.7162	4.61859	4.88974	PV [MW]		Max values	
19.4439	8.26858	0	Wind [MW]			
0	0	0	Hydro [MW]		מקורות אגירת אנרגיה מתחדשת	
2.11148	2.32263	2.11148	Storage cost [M\$]			
4.44522	4.88974	4.44522	Flow batteries [MW]	Max values		

איור 64 : השוואת האופטימיזציות השונות

נשים לב לכך שסוגיות הערות מהשוואת העלות :

1. נשים לב כי עבור מקורות האגירה נקבע עלות דומה וערכי شيئا דומים. בכל ניתוחים אנו משתמשים ב- Flow batteries מכיוון שהוא המקור הזול ביותר.
2. נשים לב כי ניתוח הפשטני נותן הערכה מאד רחוקה מההערכה הסופית שלנו. זאת מכיוון והוא אינו מתחשב כלל בתנאי מזג האוויר או לצורך השעתי אלא לוקח ערכים מקסימליים ומחשב לפיהם. בנוסף, נבחן כי בניתוח זה אנו משתמשים רק ב- PV ללא מקורות נוספים – זאת מכיוון שהוא המקור הזול מבין מקורות האנרגיה המתחדשים.
3. נשים לב כי ישנה קפיצה גדולה בעלות ההקמה והפעול של מקורות האנרגיה המתחדשת בין ניתוחים השונים. העליה נובעת מעריכי השיא של מקורות האנרגיה השונים השונים.
4. עבור ניתוח הפשטני אין שימוש באנרגיית הרוח (וזאת מכיוון שניתוח זה מניח שימוש להשתמש באנרגיה הסולארית בכל שעות היום ללא הבחנה בין יום ולילה, תנאי מזג האוויר או צורך בטיענית מקורות האגירה).

5. האנליה המורחבת מתחשבת בתנאי מזג האוויר ובשיעור היממה لكن ישנו שימוש גם באנרגיית הרוח (בשעות שלא ניתן לנצל את האנרגיה הסולארית). בנוסף, על מנת שנוכל לטוען את מקורות האגירה, באנליה זו ניתן להגיע למקסימום ההפוך (בקירוב) מערך המקסימום עבור הניתוח הפוטני.

6. עבור האופטימיזציה לפי עיקרונו ה- Energy Matching, ננצל את מערך ה- PV (כתלות בעוצמת הקירינה, מערך ה- PV יספק יותר אנרגיה) במלוא עוצמותו כשןוכל. בנוסף, על מנת שנווכל לטוען את מקורות האגירה נצטרך ערכי שייא גבוהים גם מאנרגיית הרוח (על מנת לספק תקופות שבhero הקירינה אינה מספקת). לכן, עלויות ההקמה והפעולת כל מילון אגירה אן יותר מציאותיות. על מנת לצמצם את עלויות אלה נוכל להגיד את מאגר האנרגיה או לבחור במקור אחר כאשר ישנו חוסר (למשל חיבור לרשות החשמל האזרחי ששנתמש בה רק במידה ולא נותרת ברירה). נשים לב כי לאחר הקמת טורבינות הרוח ניתן להקטין את גודל המערך הסולארי מכיוון שניתן לנצל יותר את טורבינות הרוח (עלות ההקמה הגבוהה היא המכשול העיקרי בשימוש בכל מערך). לכן, עלויות ההקמה צפויות להיות יותר נמוכות.

השוואה מול מערכת קיימת

עתה, על מנת לבדוק את טיב האופטימיזציה, נשווה את האופטימיזציה לפי עיקרונו ה- Energy Matching עם שני מאמרים. ראשית, נציג כמה מאפיינים להשוואה, עבור הניתוח שלנו :

1. עלות הקמת המערכת הכוללת (כולל אגירה) :

$$104.754 \cdot 10^6 + 2.11148 \cdot 10^6 = 106.86548 M\$\text{}$$

2. עלות התפעול השנתית הכוללת : סכמוו בעזרת המטלב את עלות התפעול השנתית במשך שנה.
עלות זו מסתכמת ב- \$M\\$

$$2.6073 \cdot 10^4 MWh = 2.6073 \cdot 10^7 kWh$$

מאמר ראשון [13] מציע אופטימיזציה עבור הכפר Leopard beach במחוז Hongsibao בעיר Wuzhong בסין. נשים לב כי לפי טבלה 3 במאמר זה, צריכה האנרגיה של הכפר היא לכל היוטר בטבלה 5 במאמר זה, מוגנות העליות עבור החלופות השונות. עבור החלופה הראשונה שכותבי המאמר מציעים - חווה סולארית, טורבינות רוח, גנרטור על בסיס בי-גז ומערך אגירה הכוללת בטריות Lead acid, וממיר (נדגיש שזו היחידה הזרלה ביותר מבין החלופות המוצעות) מתתקבלות העליות הבאות : עלות הקמת המערכת הינה \$ 293,599, את עלות התפעול השנתית נחשב לפי עלות התפעול לפי kWh, כפול הצורך הימומי המוצע של הכפר, כפול 365 ימים (שנה) ונוסף לוזה את עלות הבלאי. לכן, נקבל :

$$0.201 \frac{\$}{kWh} \cdot 620 \frac{kWh}{day} \cdot 365 day + 22697 \$ = 68,183.3\$$$

נכנich וניתן לשמר על סקילבליות. לכן, נגדיל את גודל המערכת לפי גודל המערכת שלנו. ככלומר, נכפיל את הheiten שלהם ביחס בין המערכת שלנו למערכת שלהם. נקבל כי עבור מערכת המתאימה למערכת שלנו עלות ההקמה תהיה:

$$293,599 \text{ \$} \cdot \frac{2.6073 \cdot 10^7}{620 \cdot 365} \approx 33.827 \text{ M\$}$$

עלות התפעול השנתית תהיה:

$$68,183.3\$ \cdot \frac{2.6073 \cdot 10^7}{620 \cdot 365} \approx 7.856 M\$$$

המאמר שני [14] מציע אופטימיזציה עבור Maharashtra במדינתה Pimpri כהוויה. לפי סעיף 4
במאמר, נשים לב כי צריכת האנרגיה הממוצעת של הכפר היא 2426.4 kWh/day .
לפי סעיף 6 במאמר, במערכת המוצגת ישנו שימוש בהתאם פוטו וולטאים, טורבינות רוח, סוללה,
מנזיר, גנרטור דיזל, תא דלק עם יחידתALKTROLIZOR ומכל מימן וגנרטור מתודלק בביו-גז. כתובבי
המאמר טוענים בסעיף 7 במאמר כי המערכת עדין נשאר מבוססת אנרגיה מתחדשת מכיוון
שהגנרטור פועל רק 231 שעות בשנה בעוד שעות הפעילות הסולאריות גבוהות בהרבה ועומדות על
4410 שעות בשנה.

התפעול (כוללות בלאי ודלק) שוטיות היו: \$ 588,321.72 .

נכפיל את הульויות שלהם ביחס בין המערכת שלנו למערכת שלהם. נקבל כי עבור מערכת המתאימה למערכת שלנו עלות ההקמה תהיה :

$$940,931.86 \text{ \$} \cdot \frac{2.6073 \cdot 10^7}{2426.4 \cdot 365} \approx 27.7 \text{ M\$}$$

עלות התפעול השנתית תהיה:

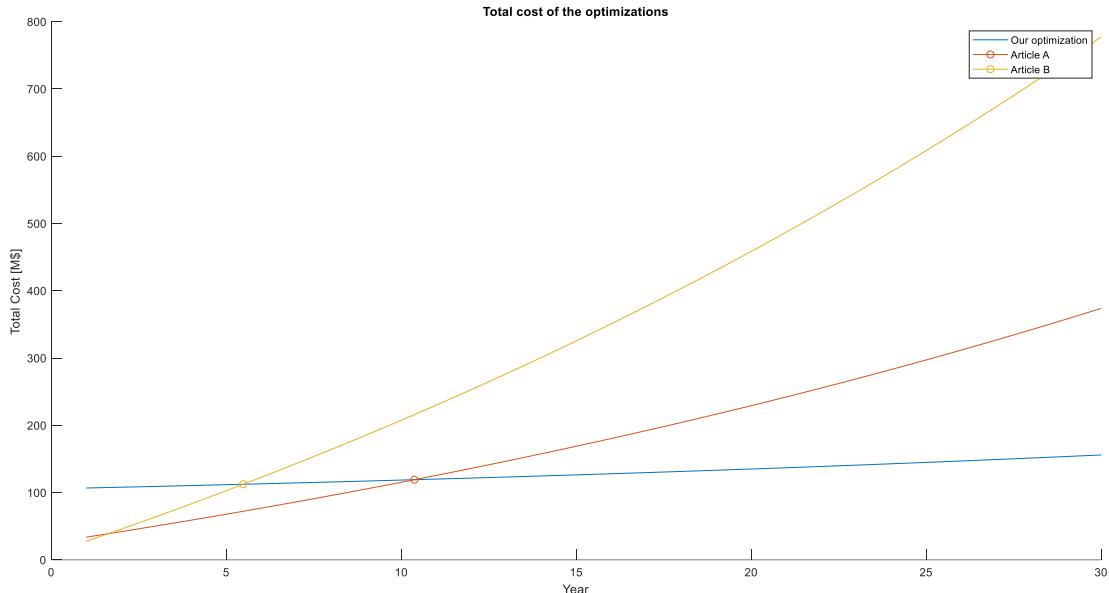
$$588,321.72\$ \cdot \frac{2.6073 \cdot 10^7}{2426.4 \cdot 365} \approx 17.32 M\$$$

נסכם את הכל בטבלה ונקבל כי:

מאמר שני	מאמר ראשון	אופטימיזציה לפי עיקרונות ENERGY MATCHING	
27.7	33.827	106.86548	עלות הקמה [M\$]
17.32	7.856	1.1353	עלות התפעול השנתית [M\$]

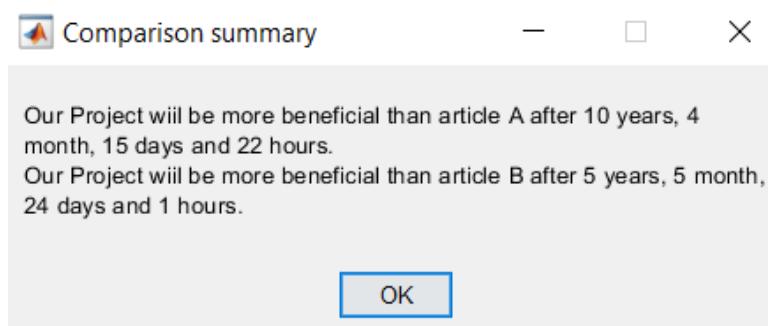
נשים לב כי קיבלנו עלות תפעול נמוכה משני המאמרים אך עלות הקמה גבוהה משמעותית יחסית לשני המאמרים. הדבר הגיוני מכיוון שהאופטימיזציה שלנו נעשתה לפי עלות התפעול ולא התחשבה לכל בעלות הקמה. בנוסף, עלות הקמה של גנרטור הפעול על בסיס בי-גז נמוכה משמעותית מעלות הקמת חלופות האחרות ומכיוון שאין לא מציעים חלופה בזו קיבלנו עלות הקמה גבוהה במיוחד.

יתר על כן, נשים לב כי ניתן לחשב עלויות אלה לאורך זמן החיים של המערכת. אורך החיים של מערכות אנרגיה מתחדשת נع בטווח הזמן של 30 – 20 שנים. לכן נחשב את העלות הכוללת לאורך טווח הזמן הזה. בחישוב שלנו ניקח כמקדם את $\alpha = 1.02311$ שמייצג את הריבית בארה"ב בשנת 2020 [15]. ריבית זו הינה שיעור הריבית שימושי מזכה לקבל בעקבות האינפלציה בשוק. ערכי α קטנים מ- 1 מייצגים אינפלציה שלילית.



אייר 66 : גраф השוואת עלות הכוללת של ה- Energy Matching מול שני מאמרים לאורך 30 שנה

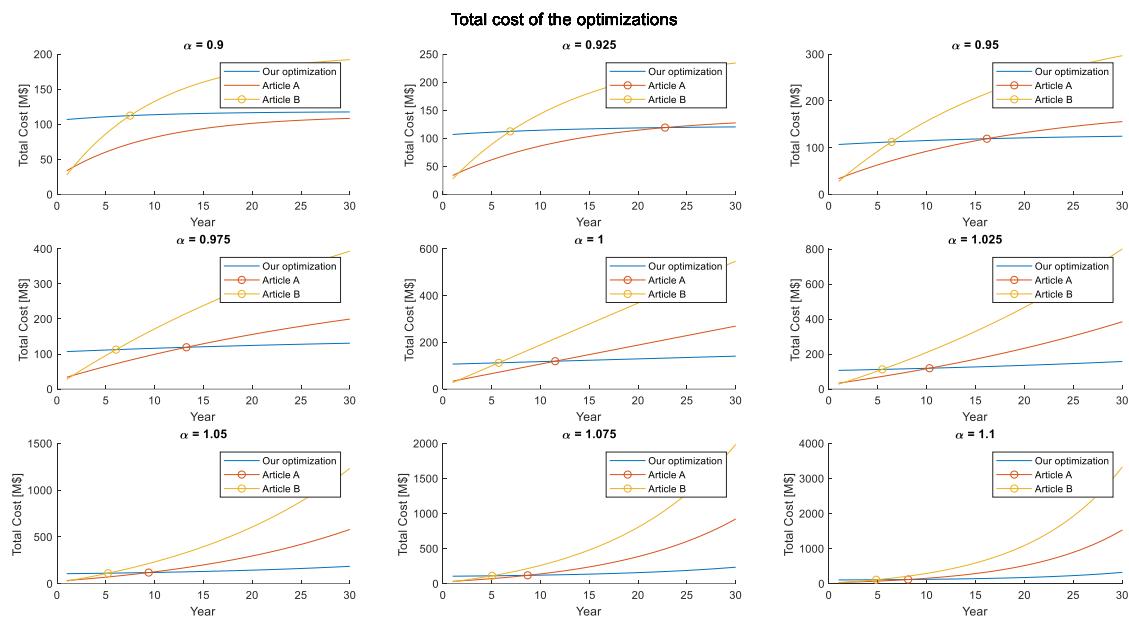
ניתן לראות באיור 66 כי לאחר זמן מה, העלות הכוללת של האופטימיזציה שלנו יותר זולה מהעלות הכוללת של שני המאמרים שמצאנו. נמצא את נקודת המעבר המדויקת בה האופטימיזציה לפי עיקנון ה- Energy Matching יותר משתלמת מהמאמרים :



אייר 67 : סיכום השוואת עלות הכוללת של ה- Energy Matching מול שני מאמרים

כלומר, במידה והמערכת עברה עושים את האופטימיזציה מיעדת לשימוש לאורך פרק זמן ארוך יותר מהזמינים המוצגים באיור 67, המערכת שלנו יותר זולה למימוש מהמערכות המוצגות במאמריהם.

נשווה בין ערכי α בטוחה $[0.9, 1.1]$ המציגים ריביות בשיעורים



איור 68 : סיכום השוואת עלות כוללת של h - Energy Matching מול שני מאמרים לארוך 30 שנה עם ריביות משתנת בטוחה $[0.9, 1.1]$

נשים לב באיור 68 כי עבור אינפלציהות שונות כמעט תמיד האופטימיזציה שלנו נמצאת מתחת למאמריהם. כלומר, האופטימיזציה שלנו יותר זולה מהאופטימיזציות המתוארות במאמריהם ברוב המקרים.

עבור ריבית של $10\% - (\text{כלומר עבור } \alpha = 0.9)$ הדבר לא מתקיים בטוחה הזמן של 30 שנים אך ניתן לראות מהגרפים כי אם נחכה לטוחה זמן גדול יותר הדבר יתקיים גם עבור ריבית זו. לכן, ניתן להסיק כי האופטימיזציה שמתבצעת לפי עלויות תפעול (בדומה לאופטימיזציה שלנו) היא האופטימיזציה הנכונה עבור הקמת mini-grids המבוססים על מערכות אנרגיה מתחדשת.

פרק 7 סיכום ומסקנות

ההסכמה עם הטענה שההתקומות הגלובלית הינה תוצאה של פליטה מעשה ידי אדם של גז חממה, הובילה לעידוד מעבר לשימוש במקורות אנרגיה חלופיים ובאופן כללי יפחיתו את חותם הפחמן של מדינות העולם. לכן, במהלך פרויקט זה, חיפשנו דרך לנתק בתים חולמים מרשת החשמל המזוהמת ולתכנן עבורים grid-min שיוננו על דרישות צריכה האנרגיה שלהם.

דרישות האנרגיה של בתים חולמים בעומס בשעת השיא הן גבוהות. לכן, יש צורך באגירת אנרגיה ייעילה במיוחד, וביצור אנרגיה מרבי ככל הנិtan. עם זאת, על מנת לעמוד בדרישות הגבוהות של ההספק הנדרש בעזרת טורבינות רוח, פאנלים סולאריים ומאגרי אנרגיה, ישנו צורך בשטוח עצום ובהשקעה כספית ניכרת. לטעמו, בכלל עלות הקמה הגבוהה של מערכות אלה, בתים חולמים ללא תמייחת אינם יכולים לנתק את עצם ממערכת החשמל.

בנוסף, רוב בתים חולמים מצויים באזורי מחייה מיושבים, ובפרט במרכזים הומיים אדום. כתוצאה לכך, השטח הפנוי לייצור אנרגיה ולאגירתה מוגבל מאוד. לצורך כך, ניתן להשתמש בשטחים מיועדים ומרוחקים, שהינים גדולים מספק ואינם מצויים במרכזים אוכטוסייה, כל עוד ניתן לשמור על רשות הולכה בטוחה ויעילה. נשים לב כי הדבר מייקר עוד יותר את עלות הקמה מכיוון שנדרשת גם מערכת הובלה ועלויות רכישת קרקעות מתאימות.

יתר על כן, ישנו סיכון בטיחותי בהצבת מתקני אנרגיה וمتקנים אגירה בתוך או בקרבת בית חולמים, הן על הקרקע והן באוויר (למשל טורבינות רוח מהוות סיכון בטיחותי לכלי טיס ממראיים ונוחתיים באזור בתים חולמים – לא ניתן לקיים פינוי מושך בתנאים שלה).

לכן, על מנת שנוכל לצמצם את פליטת המזהמים, המלצותנו הינה לייצר תחנות כוח ירוקות המורכבות ממקורות אנרגיה מתחדשים ומתקני אגירה. תחנות מסווג זה צרכות כאמור להיות מרווחקות ככל הנិtan ממרכזי אוכטוסייה, ולשרת אזורים נרחבים ברמת ערים, מחוזות ואף מדינות. כל זאת תוך שימוש בתוכנה ייודית, אשר בלתי תלולה בראש החשמל הקונבנציונלית.

במהלך ניתוחי המידע בפרויקט, השתמשנו במקורות אנרגיה סולאריים, הידרואלקטריים וטורבינות רוח. נשים לב כי מקור אנרגיה הידרואלקטרי מנוקן את הבעה מכיוון שאמנם עלותו cocciירה אך כאשר יש לבית חולמים כזו אין צורך בשימוש במקורות אחרים (זהו מקוראמין, רציף ובעל יכולת אספקת חשמל גבוהה). לכן, מקורות האנרגיה העיקריים אשר שימושו לייצור חשמל בפרויקט הינם טורבינות רוח ופאנלים סולאריים. מקורות אלה, כפי שניתן לראות, באופן מובהק תלויים באופן ממשוני בתנאי מזג האוויר, פרט לעלות הכלכלית השוטפת הנדרשת לשימוש ותחזקה של מקורות אלה. במהלך - Energy matching – נתקלנו בעיה של עריכים חריגים של הספק המיוצר מטורבינות רוח, הספק המיוצר מפאנלים סולאריים והספק המיוצר ממתקני האגירה (נבהיר כי קיוץ באחד מערכיהם אלה בא על חשבונו עליה בערך אחר). בעיה זו נובעת מה הצורך לטען את מתקני האגירה על מנת שלא נגיע במצב בו בית החולמים אינו מקבל את ההספק החדששו לו על מנת לתפקיד כמו שהוא צריך. על מנת לפתור את הבעיה, נוכל להמליץ לבית חולמים המשועני לחשוף בניתוח שלנו להשאיר את החיבור לרשות החשמל ולהשתמש בו כموצא אחרון על מנת לקבל רציפות בשעות או ביוםים הבעייתיים.

בנוסף, ניתן לנצל את הניתוח שלנו באופן חלק – למשל רק במספר הפאנלים הסולאריים ללא אגירה ולא טורבינות רוח. במקרה כזה, בשעות החושך משתמשים ברשות החשמל ובית החולמים עדין מצמצם את פליטת גזי החממה שלו.

פתרון אפשרי הוא שימוש במקורות אנרגיה יrokim נספim היכן שניתן, כמו אחוז ניכר יותר של מקורות אנרגיה הידרואלקטריים, הקמת מתקני אנרגיה ברוחבי האוקיינוסים והימים הגדולים, כמו טורבינות רוח מעבר לחופי המדינה ומהווים לקרקעות, מקורות גאותרמיים במקומות בהם אנרגיה מסווג זה זמינה, כמו איסלנד למשל.

במהלך הפרויקט, הצענו שלושה סוגים אופטימיזציות שונים. נשים לב לשינוי קפיצה גדולה בעליות ההקמה והפעול של מקורות האנרגיה המתחדשת בין הניתוחים השונים. העלייה נובעת מערבי השיא של מקורות האנרגיה. נציג כי עבור האופטימיזציה לפי עיקנון ה- Energy Matching

. קיבלנו עליות יותר מציאותיות (אך גם עליות גבוהות במיוחד).

בנוסף, בהשוואה למאמרם המקורי, נשים לב כי קיבלנו עלות פעולה נמוכה יותר אך עלות הקמה גבוהה משמעותית. הדבר הגיוני מכיוון שהאופטימיזציה שלנו נעשתה לפי עלות הפעול ולא התחשבה בכלל בעלות ההקמה. זהו הדבר הנכון לעשות מכיוון שעבור אינפליציות שונות כמעט תמיד האופטימיזציה שלנו יותר זולה מהאופטימיזציות המתוירות במאמרם. לכן, ניתן להסיק כי האופטימיזציה ש矜תבצעת לפי עליות פעולה (בדומה לאופטימיזציה שלנו) היא האופטימיזציה הנכונה עבור הקמת *mini-grids* המבוססים על מערכות אנרגיה מתחדשת.

ניתן להשתמש בפרויקט המוצע כבסיס וכתשתיית ראשונית לפרויקטים מתאימים יותר :

- הוספה מתקני אנרגיה גרעינית כמקור אנרגיה נוסף. מקור זה נחגג "ירוק" וברמת בטיחות גבוהה. בנוסף, תחנות גרעיניות חסכנות בשטח הנדרש לעומת מקורות אנרגיה מתחדשים,יעילות מבחינת ייצור אנרגיה, זולות יחסית ואינן תלויות באופן ישיר בתנאי מזג האוויר. מקור אנרגיה זה ניתן לימוש ברמה האזורית ולא עבור *mini-grid*.
- מתן משקלים שונים למקורות האנרגיה ולמאגרים השונים על פי קטגוריות, תוך שימוש בשיטות של במידה עמוקה, ובפרט רכיב גולרייזציה.
- ניתוח מדויק יותר של מקורות האנרגיה ומאגרים, כך שייצור האנרגיה ואגירתה יתבסס על תלות פונקציונלית של הספק המיצר או הנAGER בפרמטרים שונים, כמו מיפוי בין הספק המוצע מפangan סולארי כפונקציה של הקירינה מהשימוש,יעילות הפאנל, זווית ההטיה, טכנולוגיה וחומריים, הספק המוצע בטורבינת הרוח כפונקציה של המיקום, הגובה, גודל הלהבים, יעילות הטורבינה, מהירות הרוח וכיוננה.
- ניתוח כוללני לפי מאפיינים חשמליים של רכיבי הבסיס במערכת, ושל המערכת כולה, כמו מתח מקסימלי, הפסדי הולכה, צימוד קיבולי, השראות פרזיטית, שימור תדר קבוע.
- ניתוח בזמן אמיתי לפי נתוני מזג אוויר בעזרת עיבוד אותות מסתגל, שימוש במערכות בקרה דינמיות, שימוש מיטבי בדרגות החופש של המערכת כתוצאה של תחזיות מזג אוויר לטווח קצר.

פרק 8 רשימה נספחים

נספח 1: מקורות אנרגיה מתחדשים

מקורות طبيعيים בכדור הארץ, כמו שמש, רוח ומים, אוגרים בתוכם צוראות שונות של אנרגיה, אשר ניתן להמיר לאנרגיה חשמלית ולנצלן כתחליף לגנרטורים קונבנציונליים. מקורות אלה מתחדשים, בעיקר בהתאם לתנאי מגז האוויר. [16]

מערכות אנרגיה סולארית

[3], [17], [18] אנרגיה סולארית היא אנרגיה שמקורה בקרינת השמש. מתקני אנרגיה סולארית ממיירים את הקרינה האלקטרומגנטית שמגיעה מהשמש לאנרגיה תרמית או לחשמל. צריית האנרגיה העולמית השנתית משתמשת להספק קרינת השמש המגיעה לפני כדור הארץ במשך שעות ספורות. לכן, האנרגיה הסולארית יכולה להיות מרכיבי משמעותיים בשוק האנרגיה העולמי. שימוש באנרגיית השמש לצירמת חשמל יכולinctן באמצעות שתי דרכי:

- **קצירת אנרגיה תרמו-סולארית:** חימום נוזל לצורך הפעלת מנוע חום שמייצר חשמל (או עבודה מכנית).

- **קצירת אנרגיה פוטו-וולטאית:** שימוש בתאים פוטו-וולטאיים להמרת אור לזרם ישר. את האנרגיה הסולארית ניתן לנצל מיידית, או לאgor באמצעים שונים – בהתאם לצורך. אמצעי האגירה כוללים בין היתר: אגירה חשמלית בסוללות, שאיבת מים לגובה ואגירה תרמית במסות נזילות או מזקקות. בשנים האחרונות חלה עלייה בייעילות פאנלים סולאריים וירידה במחירותם. מודול פוטו-וולטאי (ידוע בכינוי – פאנל סולארי), או PV, הוא מכלול של תאים פוטו-וולטאיים המאוגדים במסגרת להתקנה. אוסף של מודולי PV נקרא פאנל PV ומ阅读全文ת של לוחות היא מערכת סולארית. כל מודול מודרג ע"י הספק הפלט DC שלו בתנאי בדיקה סטנדרטיים (STC). لكن הספק היציאה בשטח יכול להשתנות. הייעילות של המודול קובעת את שטחו בהתחשב באותה תפוקה. שטף האנרגיה הנקלט מעלה לאטמוספירה כדוחה'A מן השימוש (כלומר, הקבוע הסולארי) הוא 1366 ואט למ"ר. בغالל בליעת האטמוספירה, ההספק המגיע כדוחה'A בתנאים מיטביים (בקו המשווה, בצהרי היום, ללא ענןות ובנקודות ההיפוך) הוא כ- 1000 ואט למ"ר. בהתאם לאופן הבניה, מודולים פוטו-וולטאיים יכולים לייצר חשמל מגוון תדרי או, אך בדרך כלל אינם יכולים לכסות את כל תחום אנרגיית השימוש. לפיכך, חלק ניכר מאנרגיה זו איינו מנוצל ע"י מודולים סולאריים והם יכולים לתת יעילות גבוהה בהרבה אם הם מושרים באור מונוכרומטי. מערכת פוטו-וולטאית כוללת בדרך כלל מערך של מודולים פוטו-וולטאיים, מהפק, חבילת סוללות לאחסון אנרגיה, בקר טיננה, חיווט בין חיבורים, מפסקים, נתיקים, מתגים ניטוק, מדדי מתח ומנגנון מעקב סולاري (האחרון הינו אופציוני). ציוד נבחר בקפידה על מנת ליעיל את התפוקה, אחסון האנרגיה, הפחיתה אובדן האנרגיה ואת ההמרה מזרם ישיר לזרם חילופין.

קיצירת אנרגיה תרמו-סולארית

בשיטה זו משתמשים בעדשות ובמראות על מנת לרכז את קרני השמש ולהפיק חום לסיבוב טורבינה בשיטה הקונבנציונלית. הטכנולוגיות העיקריות הן:

- **שוקת פרבולית (Parabolic Trough)** – נוזל תרמי (שمن עם טרמפרטורת רתיחה גבוהה או מים) זורם בциינור הנמצא בנקודת המוקד של מראה פרבולית העוקבת אחר השמש במהלך היום לאורך ציר יחיד. השמן נכנס מתחילה חום שבו החום עובר למים ויוצר קיטור שנכנס לטורבינה קיטור המניע גנרטור. שיטה זו יעילה במיוחד מבחינות ניצול שטח ביחס לטכנולוגיות סולאריות אחרות.
- **מגדל שימוש – הליסטטים (Mast-based PV)** – מתקן היכול לראות עוקב אחורי תנועת השמש על פני השמיים) עוקבים אחורי השמש בשני ציריים ומרכזים את הואר לקולט מטרה הנמצאת על מגדל. כך מחממים מים לקיטור המפעיל טורבינה לייצור חשמל. ניתן לחמם את המים ישירות או בעקיפין באמצעות חומר המסוגל לצבור יותר חום. מחירי האנרגיה של תחנות אלה אינם תחרותיים.
- **צלהת פרבולית (Parabolic Dish Systems)** – צלהת הכלולת משטח קטועים פרבולי ועוקבת אחורי השמש בשני ציריים. מהחום מופק חשמל על ידי מנוע סטרלייניג (מנועה בעיר החיצונית) או טורבינה גז קטנה. בשיטה זו משתמשים במנוע חום בעל לולאט משוב חיובי סגורה במטרה להמיר אנרגיית חום לעבודה מכנית. ניתן לקבל נצילויות גבוהות בהקפי ייצור חשמל של עד שורות ומאות קילוואט בלבד. לעומת זאת, שיטה זו יעילה במיוחד בהמרת אנרגיה ובעלות אורך חיים רב.

קיצירת אנרגיה פוטו-וולטאית

המטרה ישירה של אנרגיית השמש נעשית באמצעות תא פוטו-וולטאי עשויי לרובה מסיליקון. בעת החשיפה לאור, ניטקים האלקטרונים ממוקומים ויוצרים תנועה חשמלית. היעילות של התא היא נמוכה אך מחירו נמצא במוגמת ירידה וכיום ייצור חשמל באמצעות תאים אלה מתרבה בייצור חשמל מודלים פוסיליליים.

החשמל מופק באמצעות תא PV, ע"י המרת אנרגיית השמש תוך שימוש באפקט הפוטו-וולטאי.

יתרונות וחסרונות

ה יתרונות העיקריים של האנרגיה הסולארית:

- עצמאות בהפקת חשמל (חוסר תלות במקורות דלק מתקלים ובמדינות המפיקות אותם).
- הפקת אנרגיה נקייה שאינה פוגעת בסביבה.
- אפשרות להתקנה על גגות ובכ"ץ לחסוך משאבי קרקע.
- אנרגיית השמש אינה מתכלה כמו מקורות אנרגיה המתבססים על דלק.
- התאמה טוביה לעקבות הביקושים לחשמל.
- תחנה תרמיית-סולארית יכולה לכלול גיבוי בגז תוך שימוש באותו גנרטור ולא נדרש הקמת תחנה נוספת לגיבוי.

ה חסרונות העיקריים של האנרגיה הסולארית כיהם:

- השקעה ראשונית גבוהה המتباطאת בעלות גובהה לkilowatt בהשוואה לתחנות כוח קונבנציונליות.
- הפקת אנרגיה נמוכה ותנודתית בימים מעוניינים, אי הפקה בלילה – דבר המחייב השקעה במערכות אגירת אנרגיה והשקעה בתחנת גיבוי.
- תפיסת שטח רב בהשוואה להפקת חשמל מפחם, דלק נוזלי או גז.

מודל של מערכ תאים פוטו-וולטאיים

[19] מערך PV עם N_s תאים בטור ו- N_p תאים במקביל יפיק זרם כולל:

$$I_A = N_P \cdot I_L - N_P \cdot I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V_A + I_A \cdot R_{sa})}{N_S \cdot n \cdot m \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right]$$

כארש מתקיים: V_A, I_A הם המתח והזרם של המערכת בהתאמה, ו- R_{sa} היא ההתנגדות השקולה של המערכת.

איןונוונטר פוטו-וולטאי הינו רכיב חשוב במערכת, מאפשר המרה של הספק מזרם ישיר מהמערך, להספק בזרם חילופין בראשת. ביצועי האינוונטר קובעים את יכולות הספק המוצא של המערכת הפוטו-וולטאית.

אנרגיות רוח

[5], [20] אנרגיית רוח היא האנרגיה הקינטית האצורה ברוח. אנרגיה זו ניתן להפיק חשמל (ע"י הפעלת טורבינות).

אנרגיה המופקת מרוח היא אנרגיה המנצלת את התנועה של הרוח בכו יש (אנרגייה קינטית) וממיר אותה לאנרגיה זמינה. ישנן שתי דרכיון בהן האנרגיה מנוצלת:

- שיטת העילי – כוחות העילי הפעילים על מבנה אווירו-דינמי.
גרר – סוג של דחיפה הנוצרת בכוונה של הרוח (למשל בפרש המושך סירה).

קיימות דרכי שונות לניצול האנרגיה בהתאם לתוצאה הנדרשת.

טוריינט רוח

טורבינת רוח היא מתקן המשמש להמרת של אנרגיית רוח לאנרגיה חשמלית. קיימים שני סוגים של טורבינות רוח:

- טורבינות ציר אופקי, בהן האנרגיה המכנית מסיבוב הציר האופקי מחוברת ישירות לגנרטור.
- טורבינות ציר אנכי, בהן אנרגיית הסיבוב של הציר האופקי מסובבת ציר אנכי המחבר לגנרטור
שבסיס הטורבינה.

עלות כלכלית

ההערכה היא שיצור החשמל באנרגיות רוח הוא כלכלי באזורים בהם מהירות הרוח עולה על 8 מטרים לשנייה (28.8 קמ"ש) בממוצע. למروת זאת, נבנו טורبينות רוח גם במקומות בהן מהירות הרוח נמוכה יותר. הפעלת טור宾ות בייעולות נמוכה כדיית כלכלית בגל מחורי עידוד והטבות שוננות ליצור חשמל מאנרגיות רוח.

המחיר משתנה בהתאם למיקום ונתוניים נוספים. עלות הפקת החשמל תלויות בגורמים הבאים:

- מהירות הרוח באתר : כמות האנרגיה שתופק היא ביחס לחזקה שלישית של מהירות הרוח באתר.

- גובה הטורבינה מעל הקרקע: בגבהים גבוהים יותר יש רווחות מהירות יותר ופחות מערכות

– דבר המביא לכך שטורבינות גבהות יותר מפיקות יותר חשלם.

גודל להבי התרבות: טורבינות גודלותן הן ייעילות יותר. שטח חתך הרוח שהטורבינה מכסה הוא דיסקה שתלויה בגודל הלהבים ברכיבו. ככל שהלהבים גדולים יותר, ישיחס טוב יותר בין שכבות בליה הגזים המזובזים מהיר יותר וברוחב יותר.

- דגס הטורבינה והטכנולוגיה בה יוצרה: ירידת מחירים בעליות ושיפור הביצועים של להבים ומערכות בקרה הובילו לשיפור ביצועים.
- גודל חותם הרוח: חותם רוח גדול יותר הונע משלטמות יותר בשל החיסכון בעליות הקבועות הקשורות לפרויקט וכן בשל חיסכון בעליות תחזקה ותפעול.
- מיסים ותנאי מימון: פרויקטים שנבנו באופן פרטני יכולו להחזיר את עצם במיהירות גבוהה יותר.
- עלות ההתקנה: נחבות גבויהות כדי לחסום לנפט או פחום. היא גדלה בטורבינות גבולות אך יש פיצוי בכך שהטורבינה מפיקה יותר חשמל.
- עלות התחזקה והתפעול: תלויות בגורמים רבים, כגון מיקום החווה. עלות זו נמוכה לחסית לטכנולוגיות אחרות ואנייה קירה לעומת סולארית המחייבת ניקוי תקופתי ושימוש במים שתייה או השקיה. מרבית טורבינות הרוח מתוחזקות מרוחק (לעומת שאר המתקנים המחייבים צוות תחזקה מקומי).

יתרונות וחסרונות

יתרונות:

- עלות הפקת חשמל נמוכה עקב ניצול של אנרגיה זמנית חינמית.
- המקור לאנרגיה זו הוא האנרגיה הסולארית. העליות העיקריות הכרוכות בהפקת החשמל מטורבינות רוח הן עלויות התכנון וההקמה של התchanות המבוססות עליהם. השקעה ראשונית זו יכולה להיות כדאית מכיוון שתהליך ייצור החשמל והתפעול השוטף זולים יחסית לתchanות כמו תchanות כוח פחמיות או אוטומיות. עקב פשוטות המערכות, כמה התקלות בה נמוכה יחסית למערכות אנרגיה אחרות ואנייה תורמת משמעותית לעלות התחזקה השוטפת.
- ישנים אזורים בהם עדיף להתקין טורבינות רוח (אזורים בעלי רוח חזקה במרבית שעות היום).
- טורבינות הרוח אין צורך שטח רב. בהשוואה לאנרגיית PV ניתן להגיע עד כדי 1 ל- 100 לוטות אנרגיית הרוח.
- כמות הניצול המקסימלית והאנרגיה הזמין. אנרגיית שמש יש לכל היוטר כ- 2600 – 2800 שעות שימוש זמניות במקומות הטובים ביותר. לעומת זאת, זמניות אנרגיית הרוח האפקטיבית יכולה להגיע ל- 6000 שעות ואף יותר. ככלומר, החזר ההשקעה מהיר בהרבה.
- שילוב אנרגיית רוח יחד עם אנרגיה סולארית מהויה נוסחה מנצחת.

חסרונות:

- חותם הרוח משפיעות על הסביבה בתוכה הן פועלות. המפוגעים העיקריים: רעש, פגיעה בנוף, בטיחות, פגיעה בעניות, קרינה אלקטרומגנטית, השפעה סביבתית של החומרים ופגיעה בניצול קרקעות. בנוסף, ישנו חשש לאוורור איזורי. הוצאה אנרגיה מן הרוח בכמות משמעותית יכולה להשפיע על מיקרו האקלים במקומות אליהן האויר היה זורם לפני הטורבינות. כמו כן, טורבינות צרכות אתרים מתאימים בהן יש רוחות מתאימות ואין פועלות כאשר אין רוח.
- מצד שני, רוב החסרונות הללו מתקיים במידה גדולה יותר גם במערכות פחמיניים.
- אגירת כוח: ישנה תלות מוחלטת בשיבת הרוח. ניתן להתגבר על מחשוך ברוח באמצעות תכנון מערכי טורבינות הרוח לפעולה בזמן שייא הביקוש. חיסרונו זה קשור לנושא של אגירת אנרגיה לחשמל שהופקה בעת שהרוח נשבה בחזקה.

- **כמויות התפוצה:** נדרשות הרבה טורבינות על מנת להפיק חשמל בהספק של תחנת כוח גדולה. דבר זה עלול לצרוך שטח רב. פתרונות אפשריים לכך יכולים להיות: הקמת טורבינות ייעילות יותר, שימוש בטורבינות ים או טורבינות גודלות המפיקות אנרגיה רבה יחסית. בנוסף, ניתן להשתמש גם בשטחים חקלאיים אשר בהם הפגיעה יותר קטנה.
- **רעש:** תנועת כנפי הטורבינות מאופיינית כרעש מכני וכרעש אווירודינמי. הרעש המכני נגרם ע"י פעולת המערכת (גנרטור, מסבים) ועוצמתו מושפעת מגודל המערכת. הרעש האוירודינמי נגרם ע"י תנועת הלהבים באוויר והוא תלוי בגודלם וצורתם. ניתן להפחית את הרעש האוירודינמי באמצעות שינוי צורת הלהבים. בנווף, ניתן למקם טורבינות במקומות מרוחקים כך שפגע זה אינו ישפיע בצורה גדולה.
- **השפעה על בעלי כנף:** בעיה של התנגשויות בעלי כנף בטורבינות. הסכנה לבע"ח אלה צומצמה בשנים האחרונות凭借增加叶片的厚度和减小叶片的尺寸。 שיבובם על מנת שבבעלי הכנף יראו אותם במעופן.
- **פגיעה בנוף:** ניתן לפטור זאת ע"י בחינה אובייקטיבית של גורמי הפגיעה (למשל לבנות את החומות במקומות יותר מוסתרים – בצורה שלא תיפגע הצrica או טורבינות עירוניות בעלות עיצוב מעניין כך שהיא אפשר להשתמש בהן לקישוט). בנוספ, טורבינות ים אין משפיעות כמעט בכלל על הנוף.
- **הפרעה אלקטرومגנטית:** טורבינות רוח גודלות עלולות לגרום לשראות אלקטромגנטית המפריעה לציריך אלקטוריוני. הפרעה זו משפיעה פחות מאשר תחנות כוח פחמייניות.
- **חומרים רעילים:** להבי הטורבינה בנוויים מחומרים מורכבים ולעתים קרובות מכילים זבך אפוקסי רעל. אך בדומה לחסרוו הקודם, הפרעה זו משפיעה פחות מאשר תחנות כוח פחמייניות.
- **מיקרו אקלים:** המערכת שואבת אנרגיה מן הרוח ומחילה אותה כך שהאוויר מפסיק לזרום במסלול הטבעי שלו. פגעה זו לא ניתנה להשוואה למתקן ייצור קוונטציאוני הפולט לאוויר גזוי חממה בכמויות אדירות הגורמות למיקרו אקלים סביר כל מתקן מסווג זה, זאת יחד עם הזרמת מים חמימים לים הגורמים נזק לבע"ח הימיים.
- **לטיוכום, כיומ,** במקומות רבים בעולם אנרגיית הרוח היא האמצעי הזול ביותר לייצור אנרגיה מתחדשת. בעולם מפותחים פתרונות רבים לחסרוות העיקריים של הפקת חשמל מאנרגיית הרוח. עלות הפקת האנרגיה הולכת וקטנה עם השנים בשל שימוש בעיצוב טוב יותר של הטורבינות ושאר המרכיבים. מהסיבות הנ"ל יחד עם עלית מחירי האנרגיה, ישנה עליית ניכרת בכמות האנרגיה המופקת מרוח כל שנה.

אנרגיית-מים

[7], [21] אנרגיית מים היא אנרגיה שמקורה בתנועת מים, כגון זרימת מים במדרון או מפל וצדוו. את האנרגיה מתנוועת המים ניתן להסביר בקלות לחשמל ע"י ניצול זרימת המים לסיבוב גלגל (טורבינה), המיצר אנרגיה חשמלית. הatter שבו מותמרת האנרגיה מאנרגיה מכנית לחשמלית נקרא "תחנת כוח הידרואלקטרית". מרגע שתחנה כזו נבנית ופעולה כמעט ולא נוצרים גזוי חמה או פסולת בעקבות פעולת התחנה.

שיטות: זרימת מי נהרות, אנרגיית גאות ושלפ (מתבססת על ההפרשיות של גובה גלי האוקיינוסים בעולם בזמני גאות ושלפ) ואנרגיית גלים והפרשי חום (מנצחים את גלי הים לסיבוב טורבינה וייצור חשמל).

זרימת המים יכולה להשתנות מעונה לעונה. פיתוח אתר אנרגיית מים דורש ניתוח של רשותות הזרימה של הנחלים והשיטפונות באיזור האתר, לעתים על פני עשרות שנים, כדי להעריך את אספקת האנרגיה השנתית מהימנה. סקרים ומאנרים מספקים מקור כוח אמין יותר על ידי כך שהם מאפשרים ויסות של שינויים עוניינים בזרימת המים.

הפקת אנרגיה מגלי הים

הפקת אנרגיה מגלי הים היא תהליך של ניצול אנרגיית המים מגלי הים לצורך עבודה שימושית. מכשיר המשמש להפקת האנרגיה נקרא ממיר אנרגיית גלי-ים.

מערכת קיימת להפקת חשמל מגלי הים פועלת באמצעות מערכת של מצופים ועוזרים נוספים, הממירים את אנרגיית הגלים לחשמל. מספר כוחות שונים פועלים על המצופים: כוח גלי הים, השינויים במפלס ובזרימת המים, אפקט נעילת האוויר ואפקטים נוספים.

מערכת חיישנים מנטרת באופן קבוע את הפעולות של תת המערכת השונות כמו גם את תנאי הסביבה והאוקיינוס. למערכות החיישנים יש את יכולת לחוש בסופה מתקרבת ולשנות את גובה המծופים באופן ממוכן (למשל, להעלות אותם מעל גובה פני הים) לשם הגנה עליהם מנזקי הסופה.

אנרגיה תנועת המצופים מומרת ביבשה לחץ הידראולי אשר מפעיל גנרטור המיצר חשמל. לצורך שמירה על האמינות, רק רכיבים חיוניים שלא ממוקמים במים – המצופים ובוכנות הידראוליות. יתר הרכיבים ממוקמים ביבשה.

יתרונות וחסרונות

יתרונות:

- לא מזוהם את הסביבה.
- מופעלת ע"י אנרגיית התנועה של המים – ללא שימוש במשאבים מתכליים.
- אנרגיה נקייה המוצרת ללא תהליכי עירירה
- זמינות גבוהה – סביר 90% (לעומת אנרגיית רוח בעלת 25%).

חסרונות:

- זיהום המים.
- גרים להמותם של בע"ח הימיים.
- הצפה.
- השקעה התחלתית גבוהה כדי ליצור תחנה חדשה.
- ייצור החשמל תלוי בכמות המשקעים.

אנרגייה גיאוטרמית

[22], [23] אנרגיה תרמית שמקורה בצדור הארץ. החום נובע מתוך פנים כדוחה"א, מתחת לקרום כדוחה"א. מקור אנרגיה זו נחשב למקור שאינו מתכלה. האזוריים בעולם בהם האנרגיה הגיאו-טרמית זמינים הם האיזוריים הפעילים מבחינת פעילות טקטונית. החום עולה לפני השטח באזוריים וולקניים עם הלבנה הרותחת שמקורה במקומות, או במצבם מים חמימים או קיטור מגייזרים. על פי אומדנים שנעשו, כ- 60% מפני כדוחה"א מתאימים לשימוש בשיטה זו, لكن מומחים בתחום מאמינים כי שיטה זו תוכל להוות תחליף טוב לאנרגיה מדלקית מאובנים – לאחר שהמדוענים וההנדסים יתגברו על הקשיים הטכניים וההנדסיים שכורכים בכך.

טכנולוגיות שונות

ישנם מקומות בהם הזרם הגיאו-טרמי פורץ ישירות מהאדמה. בדרך כלל צריך לקידוח באר אל תוך המאגר התת-קרקעי. גם במקרה של קידוח באר ישנה אפשרות שהחץ במאגר מספיק גובה והזרם הגיאו-טרמי יפרוץ בעצמו מפתח הבאר. ישנה גם אפשרות להתקין משאבה לתוך הבאר ולשאוב את המים החמים מהמאגר אל ראש הבאר.

רוב תחנות הכוח הגיאו-טרמיות משתמשות בקייטור, ומחזירות את המים החמים ללא שימוש חזרה לאדמה. במקרים בהם טמפרטורת הזרם הגיאו-טרמי אינה גבוהה דיה, כמוות המים בתערובת גבואה והקייטור דל מכדי לשמש להפקת חשמל עיליה ניתן להשתמש בטכנולוגיה בין-ארית: המים שחוממו ע"י הזרם הגיאו-טרמי מתחממים גז הרותח בטמפרטורה נמוכה. גז זה מתרפש בטורבינה וגורם לשיבוב של הגנרטור וליצור חשמל. ייחודה זו יכולה לשמש גם לניצול אנרגיית החום של הקיטור ללא שימוש בגז.

דרך נוספת להינה שיטה הקרויה EGS. השיטה ישימה במקומות בהם מצוי מקור חום יחסית קרוב לפניו הקרקע ללא מים. ניצולו דורש תהליך מורכב של החדרת מים שישוממו ושאייבותם, או הוצאת התערובת של מים חמימים וקייטור לשימוש בתחנות כוח אלה. בבאר כזו מבצעים מספר קידוחים عمוקים לעומק שבו נמצאים הסלעים, ומזרימים בציינור אחד מים ובציינור אחר עולים אדי המים החמים אל פני השטח ומוניעים טורבינת חשמל.

נספח 2: מאגרי אנרגיה

[9], [10], [11], מערכות אלה יכולות להזיל עלויות באופן משמעותי, תוך מתן מענה לצריכה ארגנטינאית בטוחה הארוך, והפצת האנרגיה הנאגרת בצורה יעילה וგמישה. יש צורך במאג'רי ארגנטינה זמינים ויציבים במשך שנות רבות ועד חודשים. מאג'רי ארגנטינה שאובה (בדרך כלל, אגירת ארגנטינה פוטנציאלית במאג'רי מים) היו נפוצים מבחינה היסטורית לאגירת ארגנטינה משמעותית לשעותシア, תוך הזלת מחיר הייצור. אגירת ארגנטינה באמצעות סוללות נועשית זולה, ומספקת שירותים רבים.

במקומות הומי אדם, יש צורך באגירת אנרגיה יעילה מבחינה מקומם להוזלת עלויות. תנאי חום וקור יכולים להשפיע על מאפייני סוללות ואורך החיים שלהם. קיבולת אגירה האנרגיה צפופה לששל את גודלה עד 2030, במוגמה הנוכחית של הקפלת שיתוף האנרגיה המתחדשת בין מדינות במערכות האנרגיה העולמית. בשנת 2017, הקיבולת הוערכה בכ- TWH 4.67 וצפופה לגודל עד ל- 11.89 TWH בשנת 2030. בשנת 2017, מאגרי אנרגיה שאובה היו כ 96% מהשוק.

אגירת מים שאובה

אגירת מים שאובה הינה שיטה פשוטה מאוד ונפוצה, ומתאימה לקיבולות של – 1000 [MW]3000. בשיטה זו ניתן להשתמש הן כמקור אנרגיה והן כמגזר אנרגיה, לפי הצורך, תוך שימוש בשני מגاري מים בגבהים שונים ובטורבינה. נהוג להשתמש במגזר ראשי בסדר גודל של 1200-700 מ' על מנת לשמור על דו כיווניות ונצילות גבוהה. הבעיות הכלכליות דומות להן הראשוני עברו ממקור אנרגטי מים.

אגירת אויר לחוס

בשיטתה זו נעשה שימוש בדוחיסת אויר בכלי קיבולת, השומר על לחץ גבוה יותר מהלחץ האטמוספרי, ובחרחבותו. במאגר מסווג זה, בדומה לאגירה שאובה, נעשה שימוש בטורובינה רוח זו כיוונית. אגירה זו אינה מאד נפוצה, אבל מתאימה לקנה מידה גדול כמו מאגרים שאוביים, וישנםאזורים רבים יותר המתאימים לבניית מאגרים מסווג זה. ישנה שיטה הדורשת פחות ממקום- אויר נזולי, אך מורכבת יותר. למאגר יכולת יצור של הספק עודף בשיעור של 25-60% מעבר להספק הנדרש לדוחיסת האויר. העלות הכלכלית מוערכת בכ- $\frac{\$}{kW} [900 - 400]$, ועבור תחנות ללא שינוי

חום כ- .1700 $\left[\frac{\$}{kW} \right]$

סוללות נטרו גופרית

טוללה זו מתפקדת בטמפרטורה של 300°C . האלקטרודות עשויות חומרים מומסים, ובסיס הפעולה מושתת על התגובה הכימית בינהן. החומרים נפייצים, אבל באופן כללי אמינים. לטוללה אלה זמן תגובה מהיר, אנרגיה מופצת של $400\text{ kWh}/kW$, מחזור חיים של 15 שנים, ונצלות של 85%.

.250 – 900 ₪/\$ kWh

סוללות חומצת עופרת

הניצילות של סוללות אלה נמצאת בטוחה 75-85% DC-DC. בשל הזריגה בסוללות מסווג זה, הן אינן מתאימות לאגירת אנרגיה לטוחה ארוך. בעורת תכנון נכון, זמן החיבים של הסוללות יכול לנوع בטוחה של 30-15 שנים. הסוללות אינן מתחזקות באופן מיטבי בטמפרטורה נמוכה או גבוהה. בנוסף, הן יחסית כבדות ובעלות ציפוי אנרגיה נמוכה, ומצד שני זולות וקלות למzhouר. סוללות אלה טובות במיוחד לאגירה לSierogen של אנרגיה מתחדשת כמו רוח או מים, על מנת לאפשר רציפות באספקתה. העלות הכלכלית מוערכת בכ- $\left[\frac{\$}{kWh}\right] 1200 - 500$.

סוללות ניקל קadmיום

סוללות אלה ציפוי אנרגיה גבוה והן קלות יותר מאשר סוללות חומצת עופרת, ובנוסח מתחזקות טוב בטמפרטורות נמוכות, אבל יקרות יותר. הניצילות שלהן נעה בטוחה של 70-85%, זמן החיבים שלהן הינו כ 10-15 שנים, והזריגה בהן מהירה יחסית- עד 5% בחודש. בנוסף, סוללות אלה מאוד רעילים.

סוללות זרימה (תאי דלק מתחדשים)

סוללות אלה מהוות שילוב של סוללות שגרתיות עם תאי דלק. הייחודה בהן מتبטה בכך שאגירת האנרגיה מתבצעת בתאים חיצוניים המושרים לאלקטרודות, והאנרגיה נשאבת פנימה וחוצה במידת הצורך. זמן התגובה שלהן יחסית איטי והן לא נבדקו بصورة נרחבת באופן מסחרי. העלות הכלכלית מוערכת בכ- $\left[\frac{\$}{kW}\right] 1000 - 400$.

סוללות ליתיום

סוללות אלה קלות מאוד, בעלות ציפוי אנרגיה גבוה וזמן חיים ארוך. העלות הכלכלית מוערכת בכ- $\left[\frac{\$}{kWh}\right] 1100 - 400$.

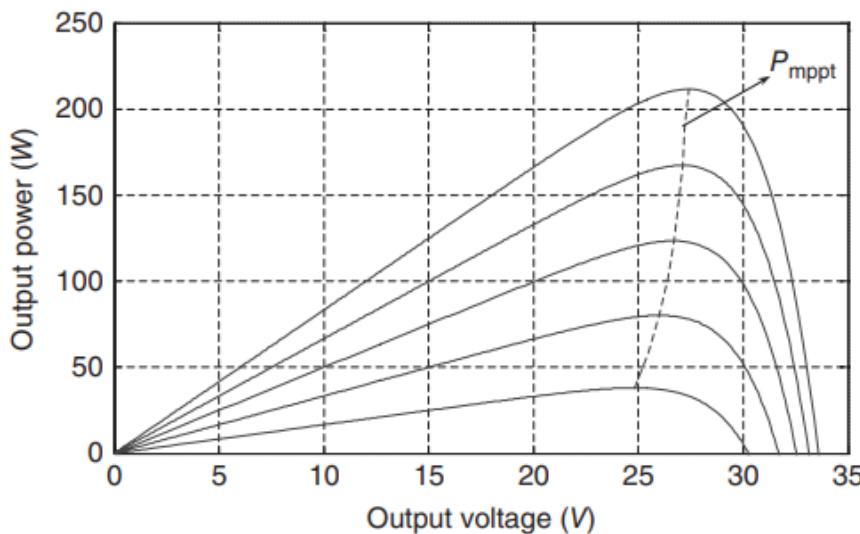
קבלים

לצורך אגירת אנרגיה נעשה שימוש בקבלים אלקטרוניים הפעילים באופן דומה לסוללות, כדי לאפשר אחסון כמות גדולה של אנרגיה. בקבלי אגירה נעשה שימוש באלקטרוליט נוזלי בחומר דיאלקטሪ, המאפשר לפתח מטען גדול יותר, ושאינו מגיב כימית עם לווחות הקבל. האלקטרוליט מאפשר לאפס את מטען הלוחות בעת הטיעינה, ומאפשר שכבה כפולה של מטען בכל לוח, ובכך מטען רב יותר יכול להיצבר. כל קבל יכול לתמוך במתוח של עד 7.9V, כדי לשמר על התכונות הרצויות. תוכן שימוש באלקטרוליט אורגני ניתן לתמוך במתוח של עד 2.7V, ובכל מקרה נהוג לאחד הרבה קבלים יחדיו על מנת להגדיל של המתוח הנתמך. הקבלים יכולים לתקן לאורך שעשרות אלפי מחזוריים, עם זריגת יחסית קטנה, בעיקר האלקטרוליט האורגани. הזריגת עלולה להקטין אגירה לטוחה ארוך, אך ניתן להגיע לניצילות של 95% בעורת מחזור מהיר. ציפוי האנרגיה של הקבלים ממוצעת, אך זמן התגובה שלהם מהיר יותר. קיבולת האנרגיה שלהם נמוכה יחסית, ויש צורך בהמרה מתחכמת מסוג DC-AC על מנת לתמוך במתוח יצאה קבוע. העלות הכלכלית מוערכת בכ- $\left[\frac{\$}{kWh}\right] 1000 - 500$, או לחילוף $\left[\frac{\$}{kW}\right] 2000$.

נספח 3: אופטימיזציה לפי נתוני מערכת

עקביה אחר נקודת ההספק המקסימלית

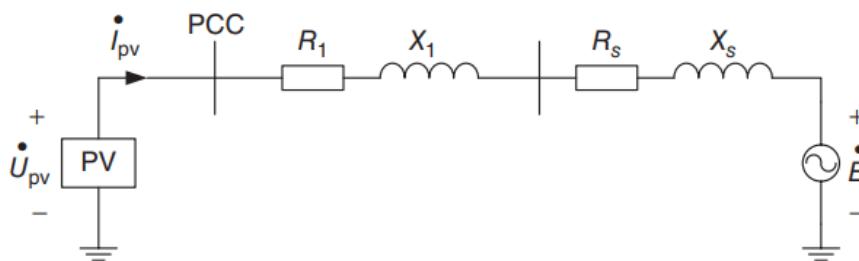
[19] במערכות הספק פוטו-וולטאיות מעשיות, עוצמת הקרינה הסולארית והטמפרטורה אין ניתנות לשיליטה. בזכות בקרת עקביה אחר נקודת ההספק המקסימלית, ניתן לכוון את מתח היציאה היישר של המערכת כך שנקבל נקודת עבודה של הספק מקסימלי במוחץ. לצורך כך, נעשה שימוש באלגוריתם חיזוי למקסימום הספק בזמן אמיתי, תחת תנאי הזורם החשמלי, באופן כזה שאייפודנס הזורם משתנה כדי לעמוד בדרישות. כל זאת, גם כאשר הטמפרטורה משתנה. ניתן לראות את אופן הפעולה באIOR 64:



AIOR 64: עקומת מקסימום ההספק של מערכ PV

השפעת המתח של תחנה פוטו-וולטאית על רשות ההפצה

הסיבה לתנודתיות במתוח בעת חיבור תחנות פוטו-וולטאיות לרשת היא תנודתיות הספק המוצא של התחנות (AIOR 65):



AIOR 65: מעגל שקול של חווה סולארית המתחוברת לרשת החשמל

אפשר לבטא את התנודתיות באופן הבא:

$$\Delta U_{PCC} = U \frac{\Delta S_{pv}}{S_K} [\cos(\phi + \theta) + j(\sin\phi\cos\theta + \cos\phi\sin\theta)], \theta = \arctan \frac{\Delta I_{pvq}}{\Delta I_{pvp}}$$

מכאן, 3 גורמים עיקריים המשפיעים על תנודתיות המתוח: השינוי בהספק המזרק ΔS_{pv} , קיבולת הקצר של המערכת S_K , ומוקם ההספק של התחנה הפוטו-וולטאית θ . לעיתים קרובות, התחנה נמצאת במצב בקרה של יחידת מקדם הספק, ונitin, באופן שקול, לקבל כי אין תלות בהספק

הリアקטיבי כלל, כלוּמֶר מתקבֵל כי $(\phi) = U \frac{\Delta P_{PV}}{S_K} \cos \Delta U_{PCC}$. התנודתיות בהספק המוצא של המערכת הפוטו-וולטאית הינו אחד הגורמים העיקריים לנזקים חמורים בראשת החשמל. התנודתיות יכולה להיגרם בשל שינויים בקרינה הסולארית בשל תנوع עננים, למשך דקוט או שעות, או בשל טופולוגיה המערכת הפוטו-וולטאית. כתוצאה לכך, עלולות להיגרם מספר תופעות, כמו צלצולים בכווים, תת עומס, עומס יתר, תנודתיות ורטט במתח.

השפעת התדר של תחנה פוטו וולטאית על רשת ההפצה

התדר הינו אחד הגורמים המרכזיים באיכות ההספק. שינוי בתדר עשוי להיגרם כתוצאה מחוסר איזון בין הייצור לבין הצריכה. אם ההספק המיצרך קטן מהספק העומס, התדר יקטן ולהיפך. שינוי בתדר זניח עבור מערכות פוטו-וולטאיות קטנות, ומשמעותי יותר עבור מערכות גדולות. שינוי בתדר עשוי להזיק לגנרטורים בשל מהירות סיבוב המנוע החשמלי. התכונות התדריות, המסוגות לסטטיות ולдинמיות, מתבטאות בעומס, בגנרטור ובמתח. התכונות הדינמיות מתייחסות לתופעות מעבר מהמצב הנורמלי למצב יציב אחר, כאשר האיזון בהספק האקטיבי נשבר. לצורך ניתוח וחישוב, אין התייחסות לשינוי הזמן בעומס ווסת הגנרטור.

אפשר לבטא את העומס בתדר כך - $P_L = P_{L0} \left(1 - \frac{K_L \Delta f}{f} \right)$. בנוסף, ההפרעה בזמן קצר יכולה להיות

מבוטאת, באמצעות מקדמי ריסון ומונטי הפיתול במערכת, באופן הבא :

$$\frac{\Delta f(t)}{f_0} = \frac{T_a}{D_T} \left(1 - e^{-\frac{D_T}{T_J} \Delta t} \right) \Leftrightarrow \Delta t = -\frac{T_J}{D_T} \ln \left(1 - \frac{D_T}{T_J} \frac{\Delta f}{f_0} \right)$$

הסטייה בתדר הגנרטור Δf נדרשת להיות קטנה ממהוות $0.1 - 0.2 \text{ Hz}$. כדי להסידר את חוסר האיזון בהספק, ניתן להגדיל את הספק הכניסה להוריד את עומס החשמל. במקרה של קצר, עתודות הייצור מופעלת כדי למנוע את קרייסט המערכת.

נספח 4: ניתוח כלכלי של רשות חכמה בעלת גנרטור יחיד

[24], ניתוח כלכלי של מערכות הספק הינו ניתוח מהותי וחשוב, לצמצום עלויות ייצור, תחת אילוצי הגנה שונים. ברשות חכמה, הניתוח מורכב יותר, בעיקר בשל אי וודאות בתנאי מזג אוויר ורוח בפרט, ובשל טעינה ופריקה של מאגרים. הגישה פשוטה, כאשר מזניחים את אילוץ הגנת הרשות, מרכיבת גנרטור יחיד, עומס יחיד, וסוללה יחידה. נניח פונקציות מחיר עבור הגנרטור ועבור הסוללה מהצורה הבאה:

$$\begin{cases} f(P_g) = \frac{1}{2} \alpha P_g^2 + \beta P_g + \gamma \\ h(P_b) = \eta(P_{bmax} - P_b) \end{cases}$$

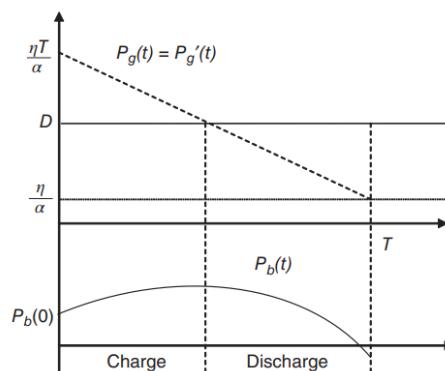
כמו כן, נניח לשם פשוטות כי העומס קבוע בכל מזמן של הרשות החכמה- $P_d(t) = D, t = 1, 2, \dots, T$. נקבל את בעיית האופטימיזציה הבאה, הכוללת אילוצים:

$$\begin{cases} \min J = \sum_{t=1}^T [f(P_g(t)) + h(P_b(t))] \\ P_b(t) = P_b(t-1) + P_g(t) - D \\ 0 \leq P_b(t) \leq P_{bmax} \\ 0 \leq P_g(t) \leq P_{gmax} \end{cases}$$

ללא אילוצים, הפתרון הוא $P_g'(t) = \frac{\eta}{\alpha}(T+1-t-\beta)$, עבור $\beta = 0$. הפתרון מעט פשוט יותר

ומתקבל גם $t_D = P_b(T) = P_b(0) + \frac{\eta}{\alpha}(T+1-T-D) = \frac{\eta}{\alpha}(T+1-D)$

$$: (איור 66) T + 1 - \frac{\alpha}{\eta} D$$



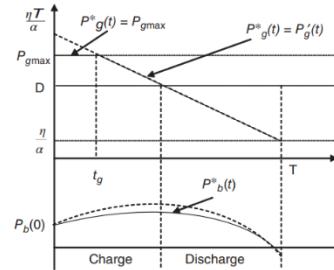
איור 7: SGED פשוט ללא אילוצים

כדי להתחשב באילוצים, יש לדרש $D \leq P_{gmax} \leq \frac{\eta T}{\alpha}$. כאשר ההספק האופטימלי חורג מן ההספק

$$: P_g'(t) = \frac{\eta}{\alpha}(T+1-t) = P_{gmax}$$

$$P_g^*(t) = \begin{cases} P_{gmax}, & \text{if } t \leq t_g \\ \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t), & \text{if } t > t_g \end{cases}$$

$$P_b^*(t) = \begin{cases} P_b(t-1) + P_{gmax} - D, & \text{if } t \leq t_g \\ P_b(t-1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D, & \text{if } t > t_g \end{cases}$$



איור 72 פשטוט עם אילוצים

כאשר יש חריגת הספק בסוללה לשני הקצויות האפשריים, נגדיר :

$$P_b(t_B) = P_{bmax}, \text{ if } P_b(t_B) > P_{bmax}$$

או לחילופין :

$$P_b(t_b) = 0, \text{ if } P_b(t) < 0$$

ונקבל :

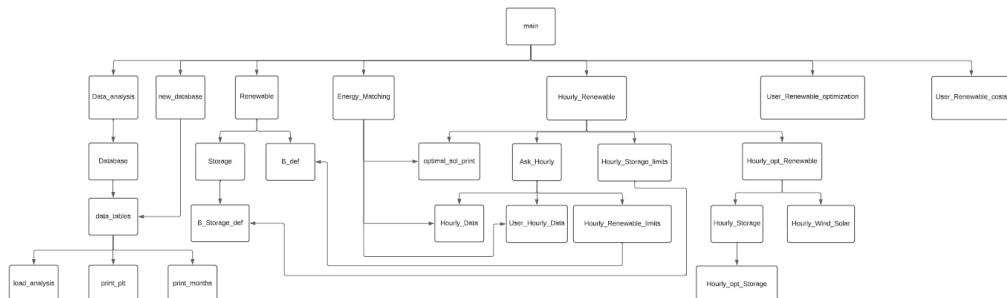
$$P_b^*(t) = \begin{cases} P_{bmax}, & \text{if } P_b(t) > P_{bmax} \\ 0, & \text{if } P_b(t) < 0 \\ P_b(t-1) + \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t) - D, & \text{if } 0 \leq P_b(t) \leq P_{bmax} \end{cases}$$

$$P_g^*(t) = \begin{cases} P_{bmax} + D - P_b(t-1), & \text{if } P_b(t) > P_{bmax} \\ D - P_b(t-1), & \text{if } P_b(t) < 0 \\ \frac{\eta}{\alpha}(T + 1 - t), & \text{if } 0 \leq P_b(t) \leq P_{bmax} \end{cases}$$

נספח 5: ניתוח קוד ה- Matlab

במהלך כתיבת הקוד כתבו תוכנית ראשית (main.m) ועשרים וחמש פונקציות נוספות למימוש התהיליכים המשניים.

התוכנית מנוטת בין הפקנציות השונות בהתאם לאיור 68:



איור 73 : תרשימים זרימה – פונקציות תוכניתה -

:main.m •

התוכנית תרכז את כל מרכיבי ההרצה:

1. אס המשמש ייחוץ בכך, נציג מהו מיקום בתיה החולמים שיש לנו במאגר המידע. לאחר מכן, נקרו לפונקציה Data_analysis על מנת לגשת למאגר המידע שלנו.

2. נתחל בניתוח הנתונים עבור המאגר שלנו על ידי קריאה לפונקציה Renewable.

3. נשאל את המשמש אם ירצה להוציא מאגר מידע חדש. במידה והוא ישיב שכן, נברר את גודל מאגר זה ונקרו לפונקציה new_database כגודל המאגר החדש.

4. ננתח את המאגר החדש שהמשמש הzin בעזרת מאגר מקורות האנרגיה שלנו על ידי קריאה לפונקציה Renewable.

5. נשאל את המשמש אם ירצה להוציא מאגר חדש עבור מקורות האנרגיה המתחדשים. במידה והוא ישיב שכן, נברר את גודל המאגר ונקרו לפונקציה User_Renewable_costs.

6. ננתח את מאגר בתיה החולמים שלנו (במידה והמשמש בחר להשתמש בו) בעזרת מאגר מקורות האנרגיה שהמשמש הzin על ידי קריאה לפונקציה User_Renewable_optimization.

7. ננתח את מאגר בתיה החולמים שהמשמש הzin בעזרת מאגר מקורות האנרגיה שהמשמש הzin על ידי קריאה לפונקציה User_Renewable_optimization.

8. נשאל את המשמש אם ירצה לבצע ניתוח שעתי של המאגר שלנו. במידה והוא יבחר שכן, נבצע אופטימיזציה על ידי קריאה לפונקציה Hourly_Renewable.

9. נשאל את המשמש אם ירצה לבצע ניתוח שעתי של מאגר מידע חדש. במידה והוא יבחר שכן, נבצע אופטימיזציה על ידי קריאה לפונקציה Hourly_Renewable.

10. נשאל את המשמש אם ירצה לבצע את האופטימיזציה הסופית. במידה והוא יבחר שכן, נבצע אופטימיזציה על ידי קריאה לפונקציה Energy_Matching.

• : Data analysis

פונקציה זו מקבלת וקטור של חמשה ערכים מקסימליים ווקטור של חמשה ערכים מינימליים ומחזירה וקטורים של ערכים מינימליים ומקסימליים לאחר עידכו. במהלך ההרצאה המשמש ישאל אם ירצה להשתמש במאגר המידע שלנו. במידה והמשתמש יענה בחיוב, נקרא לפונקציה Database.

• : Database

פונקציה זו מקבלת וקטור של חמשה ערכים מקסימליים ווקטור של חמשה ערכים מינימליים ומחזירה וקטורים של ערכים מינימליים ומקסימליים לאחר עידכו. במהלך ההרצאה המשמש יתבקש לבחור מדינה, את כל מאגר המידע או לבחור באפשרות של ביטול על מנת לצאת. לפי הזרונה הפונקציה תבחר את המקרה המתאים. במהלך הריצה תבצע קריאה של הנתונים מהמאגר, וקריאה לפונקציה data_tables בה יתרחש סידור המידע הגלומי שלנו. לבסוף ישנו חלק של התחלת מחדש של הפונקציה (במידה והמשתמש יבחר להוסיף עוד בית חולים למאגר המידע).

• : data_tables

פונקציה זו מקבלת טבלה של מידע (הטבלה המחולצת מקובץ ה- CSV – בעלת 12 טורים) ומיקום ומחזירה ערכי צריכת חשמל מקסימליים ומינימליים (ב- MWh). במהלך ההרצאה, נחלץ את המידע הדרוש לנו לטבלה חדשה, ונקרא לפונקציה load_analysis עם הטור הרלוונטי בטבלה. לאחר מכן נעדכן את ערכי המקיטומים והמינימום של הצריכה. בחלק השלישי, נקרא לפונקציה print_pct על מנת להציג את התרשימים הראשונים, נדפס למשתמש מהו מקיטומים ומינימום הצריכה (ומתי הם מתרחשים) ולבסוף נקרא לפונקציה print_months על מנת לקבל תרשימים צריכה לחודש ספציפי (אם המשתמש ידרוש זאת).

• : load_analysis

פונקציה זו מקבלת טבלה של מידע ומיקום הטור הרלוונטי בטבלה זו, ומחזירה את הוקטורים הבאים:

- וקטורי צריכת חשמל מקסימליים ומינימליים (יומיים).
- וקטור ממוצע יומי של ערכי צריכת החשמל.
- וקטור של סטטיסטית התקן היומית של צריכת החשמל.
- וקטור ממוצע חודשי של ערכי צריכת החשמל.
- וקטור של סטטיסטית התקן החודשית של צריכת החשמל.

במהלך ההרצאה מתרחשים חישובים פנימיים (שהמשתמש אינו חשוב אליהם) על מנת לנתח את המידע בצורה הטובה והמדויקת ככל שניתן.

• : print plt

פונקציה זו מקבלת מספר וקטורים :

- וקטור נתונים שעטify של הצריכה (אורך 8760).
- וקטור נתונים יומי של הצריכה (אורך 365).
- וקטור נתונים יומי המתאר את סטיית התקן של הצריכה (אורך 365).
- וקטור נתונים חודשי של הצריכה (אורך 12).
- וקטור נתונים חודשי המתאר את סטיית התקן של הצריכה (אורך 12).
- מחוזות (המתארת את סוג הגרפ – למשל צריכת החשמל הכללית).
- משתנה המייצג מיקום.
- ערכי המקסימום והמינימום (ב- MWh).

במהלך ההרצאה, הפונקציה תדפיס שישה תרשימים :

- התרשים הראשון מראה את צריכת החשמל השעתית במשך שנה (ב- kWh), בתוספת חסם עליון וחסם תחתון המציגים את ערכי המקסימום והמינימום השנתיים של הצריכה.
- התרשים השני מציג את ממוצע צריכת החשמל החודשי (ב- kWh), בתוספת שורת שגיאות המתארת את סטיית התקן של ממוצע חודשי זה.
- התרשימים השלישי והרביעי מציגים את ממוצע צריכת החשמל היומית במשך חצי שנה, בתוספת חסם עליון וחסם תחתון המציגים את ערכי המקסימום והמינימום השנתיים של הצריכה.
- התרשים החמישי מראה את צריכת החשמל השעתית (ב- kWh) ב- 1/6 – יום טיפosi בקייז.
- התרשים השישי מראה את צריכת החשמל השעתית (ב- kWh) ב- 1/12 – יום טיפosi בחורף.

• : print months

פונקציה זו מקבלת מספר נתונים :

- וקטור של נתונים.
- וקטור נוסף של סטיית התקן.
- מחוזות (המתארת את סוג הגרפ – למשל צריכת החשמל הכללית).
- משתנה המייצג מיקום.

במהלך ההרצאה, המשמש יתבקש לבחור את החודש הרצוי לו ולאחר מכן לקבל תרשימים המתאר את הממוצע היומי של צריכת החשמל באותו חודש (ב- kWh) ואת סטיית התקן היומית.

: Renewable

- פונקציה זו מקבלת שלושה נתונים:**

- הספק מקסימלי.
 - הספק מינימלי.
 - מיקום.

במהלך הרצאה נערכו עלויות תפעול והקמה של מקורות מתחדשים (סולארי, רוח, מים ואגירת אנרגיה) לפי מאגר שבנוינו. לאחר מכן, ניקח טווח ביצחון של ההספק ונעשה אופטימיזציה על ידי פיתרון בעיתת ה- Economic Dispatch. אם המשמש ירצה בכך, ניתן לעדכן את גבולות ההספק (גבול עליון ותחתון) הנדרש לכל מקור. לבסוף, נדפיס את עלויות הקמה ועלויות התפעול ופילוח התוצאות שקיבלו כפתרון האופטימיזציה.

: Storage

- פונקציה זו מקבלת שלושה נתונים:**

- הספק מקסימלי.
 - הספק מינימלי.
 - מיקום.

במהלך ההרצאה נעדכן עלויות של מקורות האגירה (מים, טורבינה, סוגי בטריות וקבליים) לפי המאגר שבנוינו. לאחר מכן, נעשא אופטימיזציה על ידי פיתרונו בעיתת ה- Economic Dispatch עבור מקורות האגירה. אם המשמש ירצה בכך, ניתן לעדכן את גבולות ההספק (גבול עליון ותחתון) הנדרש לכל מקור. לבסוף, נדפיס את עלויות האגירה ופילוח התוצאות אשר ירלוו בפתרונו האופטימיזציה.

:B def

- פונקציה זו מקבלת שני נתונים:**

- מספר המקורות שהמשתמש רוצה להשתמש בהם.
וsettor הנטיפים.

במהלך הרצאה נגידר את וקטור ההספקים לפי המקור הרצוי וגבולות ההספק שהמשתמש יבחר באורה ורקורסיבית.

:B_Storage_def

- פונקציה זו מקבלת שני נתונים:**

- מספר המקורות שהמשתמש רוצה להשתמש בהם.
בקטור הפסקים.

במהלך הרצאה נגידר את וקטור ההספקים לפי המקור הרצוי וגבולות ההספק שהמשתמש יבחר בצווחה רקורסיבית.

• : new database

פונקציה זו אינה מקבלת נתונים חיצוניים ומחזירה שני ערכאים – מקסימום ומינימום שנתי של צריכה החשמל (ב-MWh).

במהלך ההרצאה קיבל הbhara למשתמש על סוג הקובץ אותו נרצה על מנת שההרצאה תהיה תקינה. לאחר מכן, נבקש מהמשתמש להכניס את שם הקובץ ואת המיקום בו נלקחה הדגימה. על מנת לנתח את הנתונים, נקרא לפונקציה `data_tables`.

• : User_Renewable_costs

פונקציה זו מקבלת נתון אחד – גודל המאגר של מקורות האנרגיה שהמשתמש מעוניין להזין.

הפונקציה מחזירה את מספר מקורות האגירה, עלויות האגירה ועלויות מקורות האנרגיה. במהלך ההרצאה נבקש מהמשתמש להזין את כמות מקורות אגירת האנרגיה שהמשתמש מעוניין להכניס למאגר חדש. לאחר מכן, בollowah נבקש מהמשתמש להזין את העלויות של כל מקור. לבסוף, נעשה תהליך דומה עבור מקורות האנרגיה.

• : User_Renewable_optimization

הfonktsiya מקבלת שבעה נתונים :

- הספק מקסימלי.
- הספק מינימלי.
- מספר מקורות האגירה.
- עלויות מקורות האגירה.
- עלויות מקורות האנרגיה.
- גודל מאגר האנרגיה שהמשתמש הזין.
- מיקום.

במהלך ההרצאה, נעשה אופטימיזציה על ידי פיתרון בעיית ה-Economic Dispatch עבור מקורות האגירה ולאחר מכן עבור מקורות האנרגיה. אם המשתמש ירצה בכך, ניתן לעדכן את גבולות ההספק (גבול עליון ותחתון) הנדרש לכל מקור. לבסוף, נדפיס את עלויות האגירה במשחק המשתמש ופילוח התוצאות שקיבלו כפתרון האופטימיזציה.

: Hourly Renewable

- הפונקציה מקבלת נתון אחד: סוג הניתוח. במהלך ההרצאה, נקרא לפונקציה Ask_Hourly על מנת לאותחל את המערכת לקבל את המידע הדריש לביצוע האופטימיזציה. לאחר מכן, נעבור על וקטורי מג האויר על מנת לבדוק متى יוכל להשתמש במקורות המתחדרים ובמתי לא.

בשלב הבא, נתחל את ה

- העלויות
- הכספיות
- של המקורות
- המוחדים.

 נגידר את הגבולות עבור מקורות האגירה (בעזרת הפונקציה `Hourly_Storage_limits`) וביצע את האופטימיזציה (בעזרת הפונקציה `Hourly_opt_Renewable`). לאחר מכן, מתייחס האופטימיזציה שעשינו, בודכנו את מצב הטעינה של מקורות האגירה. לאחר מכן, שלחנו את כל המידע שאספנו אל הפונקציה `optimal_sol_print` על מנת להדפיס גרפים וסיכום של האופטימיזציה.

Ask Hourly

- הfonקצייה מקבלת נתון אחד : סוג הניתוח.

הfonקציה מחזירה 11 נתוניים:

- וקטור נתוני הצריכה.
 - מיקום.
 - וקטור נתוני הרוח.
 - וקטור הנתונים הסולא
 - מספר החודש (אם ישנו)
 - מספר היום (אם ישנו).
 - מספר מקורות האנרגיה
 - מגבלות ההספק הנדרש
 - וקטור B כנדרש לפונקציית
 - האם המיקום נמצוא לי
 - הפונקציה מתחילה את המ
 - במידה ונרצה לבצע אופטימ
 - נרצה לבצע את האופט

הfonkzia מתחילה את המערכת על מנת לקבל את המידע החדש לביצוע האופטימיזציה. במידה ונרצה לבצע אופטימיזציה עבור המאגר שלנו נקרא לפונקציה Hourly_Data. אם נרצה לבצע את האופטימיזציה עבור המאגר של המשתמש נקרא לפונקציה User_Hourly_Data.

: Hourly Data

- הfonוקציה מקבלת נתון אחד : סוג הניתוח.

הfonקציה מחזירה שיטה נתונים :

- וקטור נתוני ה策ריכה.
 - מיקום.
 - וקטור נתוני הרוח.
 - וקטור הנתונים הסולא
 - מספר החדש (אם ישנו)
 - מספר היום (אם ישנו).

הfonקציה מחלצת את המידע הדרוש לפי בחרית המשתמש. הפונקציה תבחר את הנתונים מהמאנגר לפי בחרית המשתמש (התאמת הנתונים ליום המתאים או לחודש המתאים או כל הוקטור עבור ניתוח שנתי).

: Hourly Storage limits

הfonקציה אינה מקבלת נתונים. הפונקציה מחזירה שלושה נתונים :

- מספר מקורות האגירה.
 - הגבלוֹת ההפְּקָדָה של מקוֹן
 - וקטור B כנדרש לפונקצי

הפונקציה שואלת את המשטמש על הגבלות הספק עבור מקורות אגירת האנרגיה. במידה
यוישן כל הפונקציה מעדכנת את הנתונים לפי הגדרות המשטמש.

: Hourly Storage

הfonקציה מקבלת 6 נתונים :

- הספק אנרגיה הางירה בזמן נתון (כולל טווח ביטחון).
 - הספק זמני מיניימלי.
 - מספר מקורות אגירת האנרגיה.
 - האם ניתן לנצל את אנרגיית המים.
 - הגבלות ההספק.
 - וקטור B עבור ביצוע linprog.

הfonוקציה מחזירה שני נתונים – מחיר והספק.

הfonקציה מבצעת את האופטימיזציה עבור מוקורות אגירת האנרגיה. האופטימיזציה תבוצע על פי הקритריונים המוסברים בספר הפרויקט בעזרת הפונקציה `linprog`.

: Hourly opt Renewable

הפון-קזחstan מתקבלת 3 נTONIM:

- הספק זמני מקסימלי (כולל טווח ביטחון).
 - הספק זמני מינימלי.
 - האם ניתן לנצל את אנרגיית הרוח.
 - האם ניתן לנצל את האנרגיה הסולארית.
 - מספר מקורות האנרגיה.
 - וקטור B כנדרש עבור linprog.
 - האם ניתן לנצל את אנרגיית המים.
 - הגבלות הספק.
 - מספר מקורות האגירה.
 - הגבלות הספק עבור מקורות אגירת האנרגיה
 - וקטור B עבור ביצוע linprog של מקורות ומקסימום של וקטור הדרישה – על מנת לחוש האנרגיה.
 - סכום אנרגיות האגירה הנדרשת.

הפונקציה מחזירה 3 נתונים:

- ערך של הספק האנרגיה האופטימלי עבור כל מקור בזמן נתון.
 - ערך של הספק האנרגיה האופטימלי עבור כל מקור אגירת אנרגיה בזמן נתון.
 - סכום אנרגיית האגירה החדשן.

הfonקציה מבצעת את האופטימיזציה עבור מקורות האנרגיה. האופטימיזציה תבוצע על פי היקריוטוניים המוסברים בספר הפרויקט בעזרת הפונקציה linprog.

:Hourly_Wind_Solar

הfonוקציה מקבלת שלושה נתונים:

- וקטור מהירות הרוח.
 - וקטור הקירינה הסולארית.
 - וקטור B כנדרש עבור linprog.

הפונקציה מציין את וקטור B המשודך.

הגדרת מගלות על וקטור \vec{C} לפי השימוש האפשרי בארגוניות הרום ובארגון הסולארית.

: Hourly opt Storage

- הfonקציה מקבלת שישה נתונים:**

- הספק זמני מקסימלי (כולל טווח ביטחון).
 - הספק זמני מינימלי.
 - מספר מקורות אגירת האנרגיה.
 - וקטור B כנדרש עבור linprog.
 - האם ניתן לנצל את אנרגיית המים.
 - הגבלות הספק.

הfonקציה ממחישה את ערך הספק האנרגיה האופטימלי עבור כל מקור אגירת אנרגיה בזמן נתון.

הfonקציה מבצעת את האופטימיזציה עבור מקורות אגירת האנרגיה. האופטימיזציה תבוצע על פי הクリיטריונים המוסברים בספר הפורוייקט בעורת הפונקציה linprog.

: Hourly Renewable limits

- ההפונקציה אינה מקבלת נתונים. הפונקציה מחזירה שלושה נתונים : מספר מקורות האנרגיה.
 - הגבולות ההספק של מקורות האנרגיה.
 - וקטור B נדרש לפונקציה linprog .

הபונקציה שואלת את המשתמש על הגבלות הספק עבור מקורות האנרגיה. במידה ויש ככלו הפונקציה מעדכנת את הנתונים לפי הגדרות המשתמש.

:optimal sol print

- הfonקציה מקבלת 13 נתונים :**

- וקטור צריכת האנרגיה השעתי.
 - מיקום.
 - עלות הקמה דרשוּה למערכות הא
 - עלות חשמל שעתיות הדרשוּה לתמ
 - עלות מאגר האנרגיה.
 - וקטור ההספקים עבור מקורות ו
 - וקטור ההספקים עבור מקורות א
 - ההספק המקסימלי עבור מקורות ו
 - ההספק המקסימלי עבור מקורות א
 - מספר החודש.
 - מספר היום.
 - גודל מאגר האנרגיה.
 - וקטור מצב הטעינה של מקור הא

הfonוקציה מדגישה חלונית סיכון לאופטימיזציה ומספר גרפים כמפורט בספר הפרויקט.

• : User Hourly Data

הfonקציה אינה מקבלת נתונים. הfonקציה מחזירה שיטה נתונים :

- וקטור נתונים הדרוש.
- מיקום.
- וקטור נתונים הסולאריים.
- מספר החודש (אם ישנו).
- מספר היום (אם ישנו).

ראשית, הfonקציהבקשת מהמשתמש את נתונים מזג האוויר ואת נתונים הדרוש (קובץ מסוג CSV לפי קритריונים המפורטים בהוראות מתאימות המודפסות למשתמש). לאחר מכן, הfonקציה מחלצת את המידע הדרוש לפי בחירת המשתמש. הfonקציה תבחר את הנתונים מהמארג לפי בחירת המשתמש (התאמת הנתונים ליום המתאים או לחודש המתאים או כל הוקטור עבור ניתוח שנתי).

• : Energy Matching

הfonקציה אינה מקבלת נתונים ואנייה מחזירה נתונים.

הfonקציה שואלת את המשתמש אם רצה לנתח את מגיר המידע או לקלוט מהמשתמש את נתונים מזג האוויר ואת נתונים הדרוש (קובץ מסוג CSV לפי קритריונים המפורטים בהוראות מתאימות המודפסות למשתמש). לאחר מכן, הfonקציה מחלצת את המידע הדרוש לפי בחירת המשתמש. הfonקציה תנתח את הנתונים מהמארג לפי בחירת המשתמש (התאמת הנתונים ליום המתאים או לחודש המתאים או כל הוקטור עבור ניתוח שנתי).

נספח 6: קבצי ה- CSV הדרושים על מנת להגדיל את מאגר המידע

סוג הקובץ הראשון הינו קובץ של צריכת ההספק. קובץ זה צריך להיות בעל 12 טורים ולפחות 8761 שורות (השורה הראשונה יהיה שם הטור, כל שורה לאחר מכן מייצגת דוגמה אחת עבור כל שעה בשנה) כאשר המידע מארגן כך:

מספר הטור	המידע הנדרש
1	תאריך ושעת דגימה
2	צרכית החשמל השעטנית ב- W עבור המתקן
3	צרכית החשמל השעטנית ב- W עבור איזורור
4	צרכית החשמל השעטנית ב- W עבור קירור
5	צרכית החשמל השעטנית ב- W עבור חימום
6	צרכית החשמל השעטנית ב- W עבור אורות פנימיים
7	צרכית החשמל השעטנית ב- W עבור ציוד פנימי
8	צרכית הגז השעטנית ב- W עבור המתקן
9	צרכית הגז השעטנית ב- W עבור חימום
10	צרכית הגז השעטנית ב- W עבור ציוד פנימי
11	צרכית הגז השעטנית ב- W עבור חימום מים
12	סכום הצרכיה הדרישה

אייר 74: תיאור קובץ ה-CSV עבור צריכת החשמל

סוג הקובץ השני הינו קובץ של מזג האוויר קובץ זה צריך להיות בעל 3 טורים ולפחות 8760 שורות (כל שורה מייצגת דוגמיה אחת עבור כל שעה בשנה) כאשר המידע מאורגן כך:

מספר הטו	המיען הנדרש
1	תאריך ושעה דגימה
2	מהירות רוח ב- $\frac{m}{sec}$ בגובה 10 מ'
3	ऊכמת הקרןיה ב- $\frac{W}{m^2}$

אאיור 25: תיאור קובץ ה-CSV עבור מזג האוויר

פרק 9**ביבליוגרפיה**

- [1] Wikipedia, the free encyclopedia, "Climate change," [Online].
- [2] United States, Department of Energy, "Open EI," 2004. [Online]. Available: https://openei.org/datasets/files/961/pub/COMMERCIAL_LOAD_DATA_E_PL_US_OUTPUT/.
- [3] Wikipedia, the free encyclopedia, "Solar energy," [Online].
- [4] P. A. Breeze, Power Generation Technologies, Third ed., Oxford, United Kingdom : Elsevier Ltd, 2019, p. 321.
- [5] Wikipedia, the free encyclopedia, "Wind turbine," [Online].
- [6] P. A. Breeze, Power Generation Technologies, Third ed., Oxford, United Kingdom : Elsevier Ltd, 2019, p. 273.
- [7] Wikipedia, the free encyclopedia, "Hydroelectricity," [Online].
- [8] P. A. Breeze, Power Generation Technologies, Third ed., Oxford, United Kingdom : Elsevier Ltd, 2019, p. 201.
- [9] P. A. Breeze, Power Generation Technologies - Ch10, Third ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier Ltd, 2019, pp. 219 - 249.
- [10] I. R. E. A. (IRENA), Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, 2017.
- [11] S. O. Amrouche, D. Rekioua, T. Rekioua and S. Bacha, "Overview of energy storage in renewable energy systems," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 41, p. 20914–20927, 12 2016.
- [12] W. Spark, "Climate and Average Weather Year Round in Houston," [Online].
- [13] Jinze Li, Pei Liu and Zheng Li, "Optimal design and techno-economic analysis of a solar-wind-biomass off-grid hybrid power system for remote rural electrification: A case study of west China," Energy, Vols. 208, 118387, 2020.
- [14] Sweta Shah, Dhruv Mahajan, Rushi Varun, Vaidik Jain and Yashwant Sawle, "Optimal Planning and Design of an Off-Grid Solar, Wind, Biomass, Fuel Cell Hybrid Energy System Using HOMER Pro.," in Recent Advances in Power Systems, 2022, pp. 255-275.

- [15] T. W. Bank, "Real interest rate (%) - United States," 2020. [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/indicator/FR.INR.RINR?locations=US>.
- [16] Wikipedia, the free encyclopedia, "Renewable energy," [Online].
- [17] P. A. Breeze, Power Generation Technologies- Ch13, Third ed., Oxford, United Kingdom : Elsevier Ltd, 2019, pp. 293-321.
- [18] Wikipedia, the free encyclopedia, "Photovoltaic system," [Online].
- [19] "Application of Renewable Energy," in OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION, John Wiley & Sons, Inc, 2015, p. 407–436.
- [20] P. A. Breeze, Power Generation Technologies- Ch11, Third ed., Oxford, United Kingdom : Elsevier Ltd, 2019, pp. 251-273.
- [21] P. A. Breeze, Power Generation Technologies- Ch8, Third ed., Oxford, United Kingdom : Elsevier Ltd, 2019, pp. 173-201.
- [22] P. A. Breeze, Power Generation Technologies - Ch12, Third ed., Oxford, United Kingdom: Elsevier Ltd, 2019, pp. 275-291.
- [23] Wikipedia, the free encyclopedia, Geothermal energy.
- [24] "Operation of Smart Grid," in OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION, John Wiley & Sons, Inc, 2015, p. 579–628.
- [25] European Commission, "PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM," [Online].