

אנרגיה גיאותרמית – ניתוח חלופות ורגולציה סביבתית

פרק בדו"ח של אנרג'יקום

ד"ר אורנה רביב |
פרופ' אופירה אילון

מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית



סביבה ואנרגיה | 12/25





אנרגיה גיאותרמית – ניתוח חלופות ורגולציה סביבתית

פרק בדו"ח של אנרג'יקום

ד"ר אורנה רביב
פרופ' אופירה אילון

דצמבר 2025

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממוסד שמואל נאמן מלבד לצורך ציטוט
של קטעים קצרים במאמרי סקירה ופרסומים דומים תוך ציון מפורש של המקור
הדעות והמסקנות המובאות בפרסום זה הן על דעת המחברות ואינן משקפות בהכרח את דעת מוסד
שמואל נאמן

תוכן העניינים

1.	מבוא	4
2.	רגולציה סביבתית	4
2.1	דוגמאות לרגולציה בעולם	5
2.3	ניתוח מחזור חיים במתקן גיאותרמי	7
3.	ניתוח חלופות	8
3.1	מחקר משווה בעולם	8
3.2	השוואת חלופות עדכנית במודל GREET	11
4.	מפת דרכים	12
5.	נספחים	15
5.1	דוגמאות מפורטות לרגולציה בעולם	15
5.2	משתנים שמשפיעים על הפליטות ממתקן גיאותרמי	18
6.	מקורות	20

1. מבוא

מתקנים להפקת אנרגיה משפיעים על הסביבה – החל משלב החיפוש של המיקום הנכון להקמתם, דרך שלבי ההקמה, התפעול, והשימוש בתוצרים, ועד לשלב של סגירת המתקן ופינוי מהשטח. את כלל ההשפעה של מתקן להפקת אנרגיה ניתן לכמת, ובהתאם לכך להעריך את העלות הסביבתית של המתקן.

עם זאת, הביקוש לחשמל רק עולה ולכן ההשפעה על הסביבה של כל מתקן תלויה בעיקר בהשוואה לחלופות הקיימות.

במשק האנרגיה קיימות מספר חלופות של מקורות אנרגיה שבאמצעותם ניתן לייצר קוט"ש¹ אחד של חשמל או יחידה אחת של הספק קיטור (ואט). העלות והתועלת, הישירה והחיצונית, שבייצור קוט"ש/ואט אחד משתנה בהתאם לטכנולוגיה ולמקור האנרגיה.

תכנון של מערכת חשמל או אנרגיה דורשת ממקבלי ההחלטות לבחור בין הטכנולוגיות ומקורות האנרגיה השונים, בין היתר בהסתמך על עלותם הכלכלית והסביבתית.

אנרגיה גיאותרמית נחשבת לאנרגיה מתחדשת ונקיה בהשוואה לייצור חשמל מגז ונפט. הייתרון שלה, בהשוואה לייצור חשמל משמש או רוח, הוא ביציבות האספקה, בדומה לתחנת baseload, שמסייעת באיזון של שינויים במערכת החשמל, שמקורם באנרגיה מתחדשת משמש ומרוח שתלויים במזג האוויר [1].

פרק זה יספק הערכה כלכלית-סביבתית של מתקני אנרגיה גיאותרמית, בהשוואה לחלופות הקיימות במשק האנרגיה בישראל, ויסכם את הממצאים במפת דרכים סביבתית לאנרגיה הגיאותרמית בישראל.

2. רגולציה סביבתית

הרגולציה הסביבתית בנוגע למתקנים גיאותרמיים מתבססת על הניסיון המצטבר לאורך שנים במתקנים קיימים (שתלוי בטכנולוגיה בה נעשה שימוש) ובניסיון למנוע השפעות חיצוניות בזמן ההקמה והתפעול של מתקנים להפקת אנרגיה וייצור חשמל, שכוללים את המתקנים הגיאותרמיים.

כחלק מהרגולציה, תהליכי רישוי כוללים בדיקות של ההשפעה על משאבי הטבע (Environmental EIA- Impact Assessments), ולאחר שהוכח שהשפעה היא במסגרת המותר ניתן לספק את הרישיון הנדרש.

ההשפעה הסביבתית הישירה והעקיפה (Direct and Indirect) כוללת מצד אחד התייחסות לפליטת מזהמים וגזי חממה, ומצד שני התייחסות להשפעות חיצוניות קריטיות על מקורות המים והיציבות בתת-הקרקע, שמגדילה את הסיכון לרעידות אדמה [2, 3].

ההמלצה העיקרית ברוב המדינות היא לבצע ניתוח מחזור חיים (LCA-Life Cycle Assessment) לפני כל עבודה בשטח. הניתוח הוא אחיד לכל מתקן שמוקם בשטח, לכל מטרה שהיא, ולכן ניתן לנתח השפעות באופן שמשווה בין חלופות ומאפשר זיהוי של החלופה שהשפעתה על הסביבה היא הנמוכה ביותר.

¹ קוט"ש = קילו ואט שעה, יחידת אנרגיה חשמלית

לאחר כימות הפליטות, ניתן גם להעריך כלכלית את ההשפעה של מזהמים וגזים לאורך מחזור חי המתקן [4]. פליטת גזי חממה מתומחרת בעולם ובישראל על פי מס-הפחמן [5] ופליטת מזהמים לאוויר, לקרקע ולמים, מתומחרת על פי השפעתה על בריאות הציבור [6, 7, 8].

ההשפעות החיצוניות האחרות כדוגמת ההשפעה על מקורות המים והרגישות הסיסמית, שונות בכל מדינה ומיקום ולכן דורשות התייחסות אחרת בתקנות הסביבתיות.

2.1 דוגמאות לרגולציה בעולם

תקנות סביבתיות בתחום הגיאותרמי עוסקות בעיקר באיכות האוויר, במשאבי המים, בשימוש בקרקע ובהגנה על המערכות האקולוגיות (מגוון מינים).

ברוב המקרים התקנות משכפלות רגולציה שקיימת במדינות אחרות בתחום האנרגיה עם התאמות לתחום הגיאותרמי ולמיקום הצפוי. התקנות עוסקות בהשפעות החל משלב הקידוחים ועד סילוק הפסולת ודרישת היתרי סביבה עבור רוב הפעולות.

תקנות אלו נקבעות ברמה הלאומית, האזורית והמקומית, ולעיתים קרובות משלבות הערכות של השפעה על הסביבה (EIA- Environmental Impact Assessments) והנחיות ספציפיות כמו הוראות בתחום המים ותקנות בנושא דליפת גזים, כאשר הרשויות המקומיות ממלאות תפקיד מפתח בניטור ובאכיפה.

בנושא הפליטות לאוויר, חוק האקלים הציב יעד לאפס פליטות בשנת 2050 ואומץ במדינות רבות. בכל מדינה קיימת רגולציה להפחתת פליטות, השקעה בטכנולוגיות נקיות והגנה על הסביבה [9].

אנרגיה גיאותרמית נחשבת מתחדשת ונקיה ולכן מועדפת ביישום בהשוואה לאנרגיה מגז, פחם ונפט. עם זאת, הרגולציה מעודכנת בהתאם למיקום הצפוי של המתקן ולידע הקיים. כך לדוגמא, במקרה של קידוחים גיאותרמיים בים (OTEC-Ocean Thermal Energy Conversion), כפי שמתבצע ביפן והוואי, חלות על המתקנים תקנות מיוחדות שמקדמות תהליכים במעגל סגור [10], שבהן מוזרם הנוזל (בדרך כלל אמוניה) בחזרה לקרקע, במטרה למזער את השפעה על המערכות הימיות [11, 12].

מקרי בוחן נוספים בהם שיקולי הסביבה משתנים הם קידוח באדמות מזהמות או שימוש בקידוחי נפט וגז קיימים לקידוח גיאותרמי [13].

הרגולציה ברוב המדינות היא כחלק מפעילות משרדי האנרגיה והסביבה, אך קיימים גם שיתופי פעולה בין-מגזריים לעיצוב יעיל של מדיניות, פרויקטים לאומיים למיפוי גיאותרמי וניתוח חלופות, והמלצה על כיווני מחקר לפיתוח החדשנות בתחום [14, 15, 16].

כך לדוגמא (טבלה 1) קיימות תקנות לבדיקת ההשפעה על הסביבה במספר מדינות בעולם [פירוט [בנספח 1](#)].

טבלה 1: תקנות ורגולציה סביבתית בעולם בתחום המתקנים הגיאותרמיים

מדינה	רגולציה סביבתית – EIA, LCA, מים וסיסמולוגיה, פליטות	שיתופי פעולה
1. האיחוד האירופי	שימוש נרחב ב-EIA ו-LCA – מיקוד בשלבים קריטיים בתהליך [פירוט בתת-פרק הבא] פליטות לאוויר – כחלק מאכיפת חוק האקלים, כולל ניטור גז במערכות חימום (F-Gas) מים וסיסמולוגיה – בדיקת טיבה למערכת המים וניטור קידוחים	המועצה האירופית לאנרגיה גיאותרמית (EGEC-European Geothermal Energy Council)
2. ארה"ב	סיווג לפי אופן ניצול האנרגיה והיישום, שיתוף LCA עם דוגמאות לאורך השנים, EIA עם פירוט מזהמים ופסולת. המלצה לקידוח באדמות מזהמות ושמירה על ערכי נוף ותיירות רישיון קידוח בים מ-NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). מים וסיסמולוגיה – ניתוח חלופות אנרגיה כלל ארצי להשפעה על מים, אוויר ורגישות סיסמית	משרדי ממשלה - לאנרגיה, לסביבה ולטכנולוגיות גיאותרמיות, ו-NOAA. מחקר לאומי מתמשך בשיתוף מעבדות לאומיות למחקר, כדוגמת - NREL, PNNL ועוד
3. יפן	שימוש ב-EIA ופירוט רשימת רישיונות נדרשים חשיבות לשמירה על מעיינות חמים (Onsen) בעשור האחרון הופחתה הרגולציה ואפשרי להקים מתקנים גיאותרמיים ב-60% משטח המדינה, כולל פארקים לאומיים. מים וסיסמולוגיה – סקר גיאולוגי-מגנטי (ממסוק עם טכנולוגיה לאיתור) נערך על ידי הממשלה.	ממשל-סביבה ואנרגיה, חקלאות ויערות; מוסדות מחקר; איגוד גיאותרמי, וארגונים לכריית משאבים
4. אינדונזיה	נדרש רישיון לחיפוש ו-EIA לפני הקמה, בפרט בפרויקט גדול. אזורי מים ויער הם מוגנים. הפרת זכויות קרקע ופגיעה בנשים הביאו לעדכון ברגולציה. מים וסיסמולוגיה – קיימת התייחסות למים ולמתקנים בים.	משרדי ממשלה וארגונים בינ"ל, ארגון אנרגיה אסיה-פסיפיק
5. אנגליה	EIA ו-LCA – רישיון סביבתי לפי סוג קידוח – עמוק ורדוד, ניטור פליטות למי-תהום או למים על פני הקרקע פליטות לאוויר – בהתאם לתקנות איכות אוויר שנוגעות לכל מתקן אנרגיה, זיהו צורך בתקנות לקידוח רדוד מים וסיסמולוגיה – בקידוח עמוק, היתר לחיפוש מי תהום (GIC) ורישיון לשאיבת מים בהספק שעולה על 20 מ"ק ביום	נערכים סקרים גיאולוגיים במימון הממשלה, בשיתוף מעבדות לאומיות בתחום הכימיה, הזרם והמסלע.
6. איסלנד	שימוש ב-EIA, הגנה על מאפיינים טבעיים כמו מעיינות, דרישה להיתרים לחיפוש וניצול, וקביעת מגבלת שימוש על ידי בעלי קרקעות עבור פעילות בקנה מידה קטן ללא היתר (לדוגמא, שימוש במים חמים בתעשייה ובחקלאות או חימום מבנים). מים וסיסמולוגיה – רישוי במשרד משותף לאנרגיה וסביבה, וברשות האנרגיה הלאומית (Orkustofnun / NEA- National Energy Authority)	מכון להיסטוריה של הטבע, משרד תכנון לאומי, רשויות מקומיות, איגוד אנרגיה Samorka, פרוייקט קידוח עמוק IDDP, אשכול אנרגיה מתחדשת, ו-GEORG - אשכול למחקר
7. ניו זילנד	חוק ניהול המשאבים משנת 1991 – לניהול סביבה ביחד עם תקנות אנרגיה גיאותרמית משנת 1961 - בטיחות, קידוח ובנייה; חקיקה אזרית - ברוטורואה (אזור תיירות גיאותרמי); הקלות לשימוש ישיר במים חמים – תעשייה, חקלאות, תיירות ומבנים; פליטות לאוויר – כחלק מחוק האקלים-דיווח פליטות;	איגוד האנרגיה הגיאותרמית

מדינה	רגולציה סביבתית – EIA, LCA, מים וסיסמולוגיה, פליטות	שיתופי פעולה
8. קוסטה ריקה [34] [35]	חסרה רגולציה ארצית, חקיקה בתהליך - שיקולים סביבתיים למשאבים גיאותרמיים בעלי אנרגיה וטמפרטורה גבוהה ונמוכה כאחד; תקנה לשימוש ישיר במשאב גיאותרמי פורסמה להתייחסות של בעלי עניין ולניתוח היבטי קיימות.	משרד משותף לסביבה ואנרגיה (MINAE- Ministry of Environment and Energy), שת"פ בעלי עניין
9. ישראל [36] [37] [38] [39] [40] [41] [42]	חסרות תקנות לגיאותרמי, קיימים חוקים למקורות אנרגיה והגנת הסביבה, ותקנות ל-EIA; רגולציה לקידוחים בים – עדיין בתהליך (פירוט בדו"ח אנרג'יקום). פליטות לאוויר – בהתאם לתקנות קיימות, מפל"ס ומתווה לאיפוס פליטות באנרגיה מים וסיסמולוגיה – חוק קידוחי המים; במשרד השיכון קיים מודל להערכת השפעות סיסמולוגיות - ללא התייחסות לקידוחים.	משרדי האנרגיה והגנת הסביבה, המכון הגיאולוגי, מנהל התכנון, רשויות מקומיות - כדוגמת רמת-הגולן, שבה נראה פוטנציאל בטווח הקצר

2.3 ניתוח מחזור חיים במתקן גיאותרמי

שיטה מרכזית להערכת ההשפעה של מתקן אנרגיה על הסביבה היא ניתוח מחזור חיים, שמתייחס למשאבים שנדרשים במהלך מחזור-חיי המתקן וכן למשאבים שמושפעים ממנו.

משאבי הטבע ב-LCA כוללים בעיקר קרקע, מים ואוויר וההשפעה עליהם תימדד בין היתר באמצעות הניטור של איכות המים והאוויר, כמות הזיהום בקרקע, ההשפעה של קידוח על השכבות בתת-הקרקע, או ההשפעה על הנוף, על המערכות האקולוגיות, ועל מקורות המים.

באירופה קיים תהליך מובנה לניתוח הפליטות במחזור החיים של מתקן להפקת אנרגיה גיאותרמית.

פליטות ישירות במתקן גיאותרמי כוללות את החומרים שנפלטים בשלבים הבאים [4]:

- הגזים הנישאים בנוזל הגיאותרמי, בין אם כגז חופשי ובין אם בצורה מומסת
- פליטות של נוזלי עבודה במתקן במחזור רנקין אורגני (ORC²) המייצר חשמל
- מזהמי אוויר הקשורים לשריפת הסולר הדרושה לאספקת אנרגיה למתקן
- פליטות מזהמים בעת בניית המפעל, כולל הרמת פלטפורמת הקידוח וסיבובו, ושאיבת הבוץ
- ניהול סוף חיי המתקן, כולל פירוק וסגירת בארות

פליטות עקיפות קשורות לייצור חומרים וייצור אנרגיה הנדרשים לאורך כל מחזור החיים של המתקן הגיאותרמי [4]. החל מחומרי הגלם לבניית המתקן, דרך התפעול שלו ועד הפסולת בסיום חיי המתקן.

² מחזור רנקין הוא תהליך תרמודינמי המשתמש בנוזלים אורגניים עם נקודות רתיחה נמוכות משל מים כדי לייצר חשמל מחום בטמפרטורות נמוכות. מערכות אלו מנצלות ביעילות חום שאינו בשימוש ממקורות כמו גזי פליטה או קולטי חום פשוטים, מחממות את הנוזל האורגני, מאדות אותו, והאדים מניעים טורבינה לייצור חשמל [50].

איסוף המידע להבנת העלות הסביבתית עקב פליטות לאוויר ולמים חשוב שיכלול את המשתנים הבאים [פירוט [בנספח](#)]:

- מאפייני המשאב הגיאותרמלי:
זיהוי השלב העיקרי לפליטת גזים; אפיון התכולה וההרכב של הגז הנפלט – ובפרט גזי חממה; מדידת עומק המערכת - הלחץ והטמפרטורה של המאגר שלפיהם צפויה דרישה לדלק; אופי המערכת ההידרותרמית - עם או בלי גירוי לזרימת הנוזלים במערכת.
- מאפייני הטכנולוגיה להפקת אנרגיה:
אופן השימוש בזרימת נוזלים (זרימה ספונטאנית, שאיבה, או העלאת גז); הטכנולוגיה להמרת אנרגיה – לייצור חום-כוח-חשמל; אופי מערכת הקירור - מקררי אוויר או מגדלי קירור רטובים; אפיון המערכת להפחתת פליטות; אופי ההזרקה החוזרת - נוזל, או נוזל וגז (NCG-גז מרוכז).
- מאפייני התפעול של המערכת:
האם המערכת היא לייצור חשמל? - הספק הייצור של המפעל, אופי הייצור - בהתאם ללחץ הקיטור במערכת וטמפרטורת הזנה והחזרה, אופן הייצור של מים חמים - בהתאם לטמפרטורת ההזנה וההחזרה של המערכת, דעיכת תפוקת אנרגיה לאורך חיי המתקן, ואורך החיים התפעולי – בתקופות השונות של המתקן (במידה וקיים שדרוג או הסבה).

איסוף מידע הקשור לפליטות אלו נחשב לשלב מכריע בעת ביצוע הערכת מחזור חיים של מפעלים גיאותרמיים.

3. ניתוח חלופות

בעולם נערכו מספר מחקרים משווים בין מתקן גיאותרמי לתמהיל קיים של יישומי אנרגיה, בהסתמך על נתונים מהשנים 2010-2021.

3.1 מחקר משווה בעולם

בארה"ב נערך מחקר משווה כלל-ארצי לבחינה מקדימה של ההשפעות הצפויות עם שילוב של מתקנים גיאותרמיים בתמהיל האנרגיה, בהשוואה לחלופה של התמהיל הקיים [16].

המחקר המשווה נערך ע"י מספר מעבדות לאומיות בארה"ב, התבסס על נתונים מהשנים 2010-2014 ופיתח תובנות וצפי עד לשנת 2050 בתחום ההשפעה על השימוש במים, הפליטות לאוויר ולגזי חממה, ופיתוח מקומות עבודה.

על פי התוצאות, עד שנת 2050 ועם השילוב של מתקנים גיאותרמיים בתמהיל האנרגיה בארה"ב לא צפוי שינוי משמעותי בביקוש למים והפליטות לאוויר יפחתו.

כמו כן, צפוי גידול משמעותי במשרות בתחום הגיאותרמי.

ההנחות עליהן התבסס המחקר היו כלהלן [16] –

- ההשפעות הסביבתיות של אנרגיה גיאותרמית –
סווגו על-פי האופן שבו אנרגיה גיאותרמית מנוצלת או האופן שבו היא מומרת לאנרגיה שימושית. כך לדוגמא, יישומים בהם נעשה שימוש ישיר במים החמים, כמו במשאבות חום גיאותרמיות, הם יישומים שהשפעתם על הסביבה זניחה בהשוואה לשימוש במשאב הגיאותרמי בתחנות כוח. ולמעשה, השפעת השימוש הישיר על הסביבה היא לטובה מאחר והוא מפחית את השימוש במקורות אנרגיה חלופיים שהם בעלי השפעה שלילית על הסביבה [17]

- מים –
 - ההשפעה של מתקן גיאותרמי מרכזי וגדול על מקורות המים תהיה משמעותית יותר בהשוואה למספר מתקנים מבזרים. כמו כן חשוב להבדיל בין מתקן שמשיב מים בחזרה לקידוח למתקן שמוביל את המים החוצה מהמתקן ומשיב אותם לקרקע בחלחול.
 - מתקן גיאותרמי, כדוגמת EGS בינארי מקורר יבש, יכול לעשות שימוש במים מליחים ומושבים ולכן הפיזור הגיאוגרפי של מתקנים גיאותרמיים יכול להיות רחב יותר וללא תלות במקורות מים מתוקים, בהשוואה למתקני חשמל שדורשים מים מתוקים (בלבד) לקירור³.
 - רוב תחנות הכוח מזריקות את הקיטור והמים הגיאותרמיים שבהם נעשה שימוש בחזרה לכדור הארץ. מחזור זה מסייע בחידוש המשאב הגיאותרמי ובהפחתת פליטות מתחנות הכוח הגיאותרמיות [16, 17].

- פליטות לאוויר –
 - תחנות כוח גיאותרמיות אינן שורפות דלק כדי לייצר חשמל, אך הן עשויות לשחרר כמויות קטנות של גופרית דו-חמצנית ופחמן דו-חמצני. הן פולטות 97% פחות תרכובות גופרית, שגורמות לגשם חומצי, וכ-99% פחות פחמן דו-חמצני, בהשוואה לתחנות כוח המופעלות בגז או נפט במתקן בגודל דומה. בחלקן קיימות מכונות ניקוי כדי להסיר את המימן הגופרתי המצוי באופן טבעי במאגרים גיאותרמיים.
 - שילוב תחנות כוח גיאותרמיות יפחית את פליטת המזהמים לאוויר בהשוואה לתמהיל הנוכחי, בשלושת הקבוצות – SO_x , NO_x , $PM_{2.5}$. יישומים נוספים שיעשו שימוש ישיר במים הגיאותרמיים, לדוגמא לצרכי חימום, יביאו לגידול נוסף בתועלת הודות להפחתת הפליטות לאוויר.
 - מבחינת גזי החממה – שילוב מתקנים גיאותרמיים יפחית את הפליטות בהשוואה למצב הקיים.

התוצאות במחקר בארה"ב התבססו על הנחות טכנולוגיות ותרמיים מקומיים שחשוב לעדכן בכל מדינה בהתאם לחדשנות הטכנולוגית ולתנאים הגיאוגרפיים המתאימים (כדוגמת עומק הקידוח והרכב המינרלים במים ובגז).

³ תוצאות אלו מניחות שטכנולוגיות EGS הן כולן מערכות בינאריות מקוררות יבש. עם זאת, אם מניחים שטכנולוגיות EGS הן מערכות פלאש מקוררות רטוב, צריכת המים תגדל והפריסה הגיאותרמית תפחת.

⁴ גופרית דו-חמצנית (SO_2), תחמוצות חנקן (NO_x) וחלקיקים דקים ($PM_{2.5}$) (nitrogen oxides - NO_x , sulfur dioxide - SO_2 , fine particulate matter - $PM_{2.5}$).

מחקר משווה נוסף שנערך באירופה [43] ניתח את ההשפעות הסביבתיות בכמה מתקנים גיאותרמיים והשווה אותם להשפעות בייצור חשמל משמש ומתמחיל האנרגיה של מספר מדינות. הנתונים במחקר היו בעיקר מהשנים 2020-2021 אך היו התייחסויות גם למחקר קודם מהשנים 2012-2019. המתקנים הגיאותרמיים בניתוח-ההשוואתי כללו טכנולוגיות של (1) CHP (combined heat and power), (2) Dry- Steam, (3) RC (Rankine-Cycle), (4) ORC Binary-cycle, ו-(5) ORC-Cycle.⁵

תוצאות המחקר כללו את התובנות הבאות –

- סיכום ההשפעות הסביבתיות לאורך כל מחזור החיים במתקנים 1,2,3 היה ברובו (מעל 70%) בשלב התפעול בעוד שבמתקנים 4,5 מירב ההשפעה (90%) הייתה בשלב הבניה. השפעה עיקרית בשלב הבניה אופיינית למתקנים שהתפעול שלהם נעשה במעגל סגור מופחת-פליטות (בטכנולוגיית ORC).
- התלות במינרלים ובמתכות היה משמעותי ביותר בשלב הקידוח (מעל 50% מהמשאבים) במתקנים 3 ו-5 (טכנולוגיות RC ו-EGS בהתאמה).
- השימוש במים היה משמעותי (מעל 90%) בשלב ההקמה במתקנים 2,3,4 (טכנולוגיות FLASH, RC, ו-ORC בהתאמה).
- הפליטות לאוויר ולמים (בחלקם חומרים מסרטנים) היו ברובם בשלב הקידוח במתקן 1 (מעל 80%, במתקן CHP) וכן במתקנים 4 ו-5 (מעל 50%, במתקני ORC).
- ההשפעות בשלב ייצור החשמל (בלבד) במתקנים הגיאותרמיים היו –
 - במתקנים 1,4 (CHP ו-ORC-Binary) – השפעה נמוכה ביותר, עם היקף השפעה בשיעור של כעשירית מההשפעה בייצור חשמל משמש (PV-Photo-Voltaic).
 - במתקנים 2,3 (Dry-Steam ו-Flash) – ההשפעות היו הגבוהות ביותר, פי-3 בהשוואה לחשמל משמש.
 - במתקן 5 (ORC-cycle) – ההשפעה הייתה כפולה בהשוואה לחשמל משמש.
- למרות ההשפעות שצוינו, ההשפעות בייצור של חשמל גיאותרמי היו בממוצע נמוכות מההשפעה הממוצעת של התמהילים לייצור חשמל במדינות איטליה ובריטניה, ולכן שילובם בתמהיל צפוי להקטין את ההשפעות הסביבתיות של ייצור החשמל במדינות אלה [43].

מחקר נוסף שהתמקד בפליטה של גזי חממה בלבד לאורך חיי מתקנים לייצור חשמל, הסתמך על נתוני מודל GREET⁶ ומצא שהפליטות במתקנים גיאותרמיים דומים לאלה של מתקנים הידרואלקטריים ושניהם נמוכים מהפליטות לאורך מחזור החיים של מתקן PV [44].

⁵ (1) Hellisheiði is a large CHP (combined heat and power) double-flash power plant in Iceland; (2) Chiusdino is a 20 MW dry steam power plant in Italy; (3) Bagnore 3 and 4 are two geothermal sites in Italy, considered as single-plant, Rankine-Cycle (RC) with heat-pump; (4) Qualtra is a 10 MW size ORC (Organic Rankine Cycle) binary cycle plant in Italy, including a complete reinjection of CO2 within the resource reservoir; (5) The United Down Deep Geothermal Project (UDDGP) is an Enhanced Geothermal System (EGS) in UK, based on 2-3 wells employing an ORC cycle.

⁶ מודל GREET הוא כלי ניתוח של מחזור חיים (Life Cycle Analysis) שפותח על ידי מעבדת ארגון (Argonne National Laboratory) המופעלת על ידי משרד האנרגיה של ארה"ב. GREET משמש להערכת השפעות סביבתיות של טכנולוגיות שונות, כולל גזי חממה, פליטות מוסדרות וצריכת אנרגיה, לאורך כל שרשרת האספקה, מטכנולוגיות תחבורה ודלקים ועד לתהליכי ייצור ומחזור. שם המודל הוא ראשי תיבות של Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies, כלומר: גזי חממה, פליטות מוסדרות ושימוש באנרגיה בטכנולוגיות [45].

לסיכום, ההשפעה על הסביבה תלויה מאוד בטכנולוגיה, במיקום ובמאפייני המים והגז, בחלוקת ההספק בין שימוש ישיר לייצור חשמל, ובהתקנה של אמצעים להפחתת פליטות, ולכן הצפי הוא שחדשנות בטכנולוגיה ומשתנים גיאוגרפיים יובילו לשינוי בהשפעות בכל מתקן.

3.2 השוואת חלופות עדכנית במודל GREET

במטרה להשוות את ההשפעות האפשריות של מתקנים לייצור חשמל, בהתאם לתמהיל של משרד האנרגיה לקראת שנת 2050, שלפנו נתונים ממודל GREET [45], שמשקפים הערכה של השפעה על הסביבה בייצור אחד קילו-ואט-שעה (קוט"ש) חשמל, על פי נתוני שנת 2021 ממתקנים דומים בעולם.

טבלה 2 כוללת שבעה סוגים של מתקנים לייצור חשמל - שני סוגים של פאנלים סולאריים (הרכב סיליקון יחיד/רבים), שלושה סוגים של תחנות כוח גיאותרמיות (Flash, Binary, EGS), טורבינת גז במחזור משולב (מחז"מ) וכן מתקני גרעין קטנים (SMR – Small Modular Reactor, בטכנולוגיית LWR ו-HTGR).

טבלה 2: השוואת השפעות של ייצור קוט"ש אחד של חשמל [2021] בטכנולוגיות שונות בעולם

מקורות - אנרגיה							
סדיר (Baseload)					מתחדש - לא סדיר		
גרעין SMR	גז NGCC	גיאותרמי Flash	גיאותרמי BINARY	גיאותרמי EGS	PV [Multi-Si]	PV [Single-Si]	השפעות בייצור קוט"ש אחד של חשמל
1,751	721	4,542	6,435	3,596	376	696	מים [סמ"ק]
6	494	91	-	-	32	27	גזי חממה [גר']
3,696	8,049	3,600	3,600	3,600	57	53	משאבים* [קילו-ג'אול]
(רשימה - חלקית)							מזהמים לאוויר [מ"ג]:
3	70	-	-	-	2	1	VOC – רכיבים אורגניים
11	216				5	5	CO – תחמוצת פחמן
11	265				23	22	NOx – תחמוצות חנקן
1	21				31	28	PM ₁₀ – חלקיקים 10
1	20				5	5	PM _{2.5} – חלקיקים 2.5
3	84				4	3	Sox – תחמוצות גופרית

הערכים המודגשים בטבלה מסמלים את המתקן בעל ההשפעה הנמוכה ביותר
* משאבים במתקני PV נוגעים בעיקר לשלב ייצור הפאנלים והמשאב במתקן גיאותרמי הוא בעיקר גיאותרמי או מתחדש

ניתן לראות את ההבדל המשמעותי בין המתקנים השונים לייצור חשמל בהשפעות על משאבי הטבע – המים, איכות האוויר, גזי החממה והמחצבים.

על פי ההערכה, קיים ייתרון בולט למתקנים בטכנולוגיית PV וגיאותרמי, בהשוואה לאחרים, ובפרט הייתרון של החשמל הגיאותרמי כתחליף לגז וגרעין שמשמשים כמתקני baseload, ומאפשרים שילוב של חשמל ממקור מתחדש כדוגמת PV.

עם זאת, המידול ב-GREET לא כולל כמה משתנים קריטיים, כדוגמת -

1. ההשפעה על מקורות המים והספיקה בהם
2. הסיכון לרעידות אדמה והגברת הרגישות הסיסמית
3. הסיכון עקב תקלה במתקן גרעיני והטיפול בפסולת
4. ההשפעות הייחודיות של מתקנים גיאותרמיים בים

לפיכך, ניתוח חלופות מעמיק הוא הכרחי לפני כל קבלת החלטות בתחום.

4. מפת דרכים

- מיקוד בישראל ולימוד מהנעשה בעולם, מחדד את החשיבות של התובנות הסביבתיות הבאות -
1. מתקן גיאותרמי נחשב למקור אנרגיה מתחדש ונקי, הן בשימוש במשאב כאנרגיה בתחנת כוח לייצור חשמל והן בשימוש ישיר במשאב הגיאותרמי (לדוגמא, אוויר ומים חמים בתהליכי חימום).
 2. תחנת כוח גיאותרמית מספקת חשמל יציב (כדוגמת חשמל מתחנת גז או נפט), שמסייע בתהליך השילוב של חשמל משמש או רוח, שהוא תנודתי, ברשת החשמל.
 3. ההשפעות של מתקן גיאותרמי על הסביבה הן בעיקר בשני תחומים - ראשית, הסיכון למקורות המים, עקב השפעה אפשרית על ספיקה, והסיכון בערעור היציבות הסיסמית, החל משלב הקידוח לאיתור המשאב; ושנית, לאורך מחזור החיים היקף השימוש במים, הפליטות לאוויר ולמים, ופליטת גזי חממה.
 - ההשפעה על מקורות המים והרגישות הסיסמית היא קריטית ולכן ברוב המדינות מתבצע מחקר לאומי לאיתור המיקומים הרגישים ואלה בהם ניתן לאשר קידוח למטרות הפקת אנרגיה.
 - ההשפעות על איכות האוויר והמים מנוטרות בדרך כלל באמצעות מסמך השפעה על הסביבה וניתוח מחזור חיים.
 4. בהסתמך על ניתוח חלופות בעשור האחרון, היקף הפליטות הכולל והשימוש במשאבים במתקן גיאותרמי הוא בסדר גודל של אנרגיה מתחדשת ונקיה כדוגמת חשמל ממתקן סולארי פוטו-וולטאי.
 5. הקמת מתקן גיאותרמי בים, בפרט בשימוש בקידוחים קיימים להפקת גז ונפט, מחייב התייחסות מיוחדת בתקנות באמצעות שילוב רגולציה ממספר תחומים
 6. מערכות חדשות כדוגמת EGS במעגל סגור מפחיתות השפעה סביבתית משמעותית בהשוואה לטכנולוגיות קיימות כדוגמת Flash או Binary-cycle, ומתאימות ליישום בפרט בשימוש בקידוחי-גז ונפט בים כמתקנים גיאותרמיים.
 7. ההשפעה הסביבתית תלויה מאוד בטכנולוגיה, במיקום ובמאפייני המים והגז, בחלוקת ההספק בין שימוש ישיר לייצור חשמל, ובהתקנה של אמצעים להפחתת פליטות.
 8. חדשנות בטכנולוגיה, בשלבי הקידוח, ההקמה והתפעול, תוביל לשינוי בהשפעות בכל מתקן ובתקופות לאורך מחזור החיים של המתקן.

בהתאם לכך ובהתאם למצב בישראל, אלה ההמלצות לטווח הקצר והארוך בתחום המדיניות הסביבתית –

בטווח הקצר -

1. בכל שלב ובכל החלטה – קריטי לנתח קודם כל את החלופות השונות וההשפעה בכל חלופה, ואז לקבל החלטה. הן בהחלטות שנוגעות למדיניות לאומית, והן ברגולציה אזורית ומקומית.
2. חשוב לבצע מחקר ולייצר בסיס נתונים ארצי שיאפשר ניתוח איכותי של IEA ו-LCA בישראל, בתחומים הבאים [16] -

- ניתוח של השפעות סיסמולוגיות אפשריות לפי שיטת קידוח ומיקום בישראל, במטרה לזהות מיקומים בהם הסיכון גבוה יותר ולכן תידרש התייחסות מיוחדת לכך ברגולציה
- ניתוח של השפעות על מקורות המים בעקבות קידוח אפשרי במיקומים שונים בישראל, במטרה לזהות אזורים שבהם הסיכון גבוה ויש להיערך בהם אחרת לקראת פעילות עתידית
- ניתוח מחזור חיים של מתקנים לייצור חשמל בישראל, כולל גיאותרמי (גם אם מדובר בהערכה תיאורטית על סמך התאמה של נתונים מחו"ל לישראל במטה-אנליזה)
- חלופות והשפעות צפויות עם הסבת קידוחי גז ונפט בים למתקן גיאותרמי חדיש במעגל סגור [10]

רגולציה ותקנות שיחייבו ביצוע IEA ו-LCA בעתיד יוכלו להסתמך על בסיס הנתונים שיוקם במהלך הניתוח הכלל-ארצי הראשוני ולהתייחס לשינויים הצפויים באופן אחיד באמצעות השוואה בין ערכים לאורך זמן.

3. לקדם שיתופי פעולה בין משרדי האנרגיה והסביבה, המכון הגיאולוגי, ארגון אנרגיות מתחדשות, מקורות, וכל גוף מחקר ותעשייה שרלוונטי לתחום, במטרה לשתף ידע ולשפר את תהליכי קבלת ההחלטות באמצעות שיתוף בעלי עניין מהיום הראשון.
4. לנסח מסגרת רגולטיבית למתקנים גיאותרמיים באמצעות התאמה של רגולציה קיימת בישראל מתחומים של הקמת תחנות כוח וקידוחי מים ונפט, ולהוסיף עליה רגולציה מהעולם בהתאם לתנאים בישראל. המסגרת הזו חייבת להתבסס על ניתוח חלופות טכנולוגי-כלכלי-סביבתי-חברתי לפני קבלה של החלטות בתחום.
5. להעביר מידע לאשכולות האזוריים בישראל לגבי התהליך הצפוי ובמטרה לזהות את הצורך בתקנות מקומיות כהשלמה לתקנות הארציות. כך לדוגמא, אם ההתכנות הראשונית להקמת מתקן היא בגולן – שיתוף הידע והפעילות עם בעלי העניין בגולן הוא הכרחי באופן מידתי.
6. לבצע ניתוח חלופות אזורי טכנולוגי-כלכלי-סביבתי של תמהיל חשמל ואנרגיה עם שילוב של חשמל גיאותרמי, בהתאם להיצע, לביקוש ולמאפיינים האזוריים של כל אשכול. ניתוח החלופות ישמש כלי למקבלי ההחלטות בתהליכי מימון אזורי וארצי של יוזמות בתחום החשמל והאנרגיה.
7. לקדם מיזמי חדשנות לפתרונות ברי-קיימא בשיתוף פעולה של אקדמיה-תעשייה-ממשל בתחום הקידוח, ההקמה והתפעול של תחנות-כוח ושימוש ישיר במשאב הגיאותרמי. הפעילות יכולה להתקיים כחלק ממרכזי חדשנות קיימים או במרכז חדש שייועד רק לתחום הגיאותרמי.
8. לשתף את הציבור במידע, בעלות ובתועלת הסביבתית של שילוב אפשרי של מתקנים גיאותרמיים בישראל. שיתוף גורמים סביבתיים כדוגמת רשות הטבע והגנים הוא חשוב, אבל לא מהווה תחליף לשיתוף הציבור בתהליך קבלת ההחלטות החברתי-סביבתי.

בטווח הארוך -

1. לפתח כוח-אדם מיומן להשתלבות בתהליכי הרגולציה הארצית והאזורית, לפיקוח על יישומן לאורך זמן ועל עדכון התקופתי בהתאם למשוב מהשטח.
2. לבצע פיילוט או סימולציה של הקמת מתקן בגולן בהתאם למסגרת הרגולציה הסביבתית הארצית והמקומית שנקבעה, ולשפר את התקנות בהתאם לממצאים, במטרה לצמצם עד כמה שאפשר את אורך תהליכי האישור והמורכבות שלהם.
3. ככל שהטכנולוגיה והחדשנות מתפתחות ומאפשרות תועלת מהמשאב הגיאותרמי במקומות נוספים, חשוב לקדם קידוחים ומתקנים בשיתוף פעולה עם האשכולות ולעדכן את הרגולציה באופן תקופתי ובהתאם למשתנים הטכנולוגיים, הכלכליים, הסביבתיים והגיאוגרפיים בכל אתר ואתר.
4. לבצע עדכון תקופתי של מסד הנתונים הארצי – בתחום הסיסמי, בתחום מקורות המים וההשפעות על האויר והמים, ובהתאם למאפייני המשאב הגיאותרמי בכל אזור.
5. לקדם שימוש אזורי ומקומי במשאב הגיאותרמי בשימוש ישיר ובתחנות כוח ייעודיות בתעשייה. שימוש במתקן גיאותרמי ייתר תחנות כוח ויישומים שמשתמשים בדלק בעל השפעות שליליות על הסביבה.
6. לקדם שימוש במינרלים שמופקים במתקן הגיאותרמי בשימושים מקומיים, באופן שישפר את ההשפעה הסביבתית של שרשראות האספקה ובאמצעות ניתוח חלופות כלכלי-סביבתי.
7. הצטרפות נציגים מישראל לארגונים בינ"ל לרגולציה סביבתית בתחום הגיאותרמי לקידום מחקר ושיתופי ידע.

5. נספחים

5.1 דוגמאות מפורטות לרגולציה בעולם

פרטי התקנות במספר מדינות בעולם –

• האיחוד האירופאי

הרגולציה של האיחוד האירופי מהווה בסיס לכל התקנות במדינות האיחוד. חוק האקלים הציב יעד לאפס פליטות בשנת 2050 בכול מדינות האיחוד האירופי, על ידי הפחתת פליטות, השקעה בטכנולוגיות נקיות והגנה על הסביבה [9]. אנרגיה גיאותרמית נחשבת מתחדשת ונקיה ולכן מועדפת ביישום.

לצורך התאמת הרגולציה למתקנים גיאותרמיים הוקמה המועצה האירופית לאנרגיה גיאותרמית (EGEC-European Geothermal Energy Council), שהיא ארגון ללא מטרות רווח המקדם את כל היבטי התעשייה הגיאותרמית. מטרת המועצה היא להקל על המודעות וההרחבה של יישומים גיאותרמיים ברחבי אירופה על ידי עיצוב מדיניות, שיפור תנאי השקעה והכוונת מחקר. במועצה חברים למעלה מ-200 נציגים מ-30 מדינות, החל מיזמים ועד יצרני ציוד, ספקי אנרגיה, איגודים לאומיים, יועצים, מרכזי מחקר, סקרים גיאולוגיים, סוכנויות ממשלתיות, מחלקות ורשויות ציבוריות. שיתוף הפעולה בין כל בעלי העניין מאפשר ל-EGEC לייצג ולקדם את כל המגזר הגיאותרמי [14].

התקנות האירופיות, הלאומיות והאזוריות בנוגע לטכנולוגיות של אנרגיה גיאותרמית שואפות למנוע השפעות סביבתיות על כל מקטע של שרשרת הערך, החל מקידוחים ועד גזים עתירי דלק המשמשים במשאבות חום עבור מערכות חימום גיאותרמיות. תקנות אלו יכולות להיקבע ברמה האירופית, באמצעות הנחיות או תקנות, וייתכן שהסוכנות האירופית לאיכות הסביבה תנטר אותן. עם זאת, האכיפה מתרחשת בדרך כלל ברמה המקומית, שבה רשויות וסוכנויות לאומיות ואזוריות ממלאות תפקיד מפתח ביעוץ לפרויקטים חדשים, ניטור מתקנים קיימים ואכיפת תקנות במקרה של הפרה.

התרגום של כלל הדירקטיבות והרגולציה מתמקד בשלושה תחומים עיקריים – הדירקטיבה למערכת המים, הערכת ההשפעה על הסביבה (EIA-Environmental Impact Assessment), והרגולציה בנושא הגז במערכות חימום (F-Gas - Fluorinated-gases).

ההערכה של ההשפעות על הסביבה מתבטאת בדרישה לניתוח מחזור החיים של המתקן [2], כפי שמפורט [בתת-פרק הבא](#).

• אנגליה [46]

לא קיים חוק גיאותרמי, ולכן התקנות באנגליה הן על פי הרגולציה בתחום הנפט והמים. התקנות דורשות שלושה אישורים – היתר לחיפוש מי תהום (GIC - groundwater investigation consent), רישיון לשאיבת מים בהספק שעולה על 20 מטרים מעוקבים ביום, ורישיון סביבתי כאשר יש פליטות לקרקע, למי-תהום או למים על פני הקרקע. בתחום איכות האוויר מדובר ברגולציה כללית.

• ארה"ב [16, 17]

משרד האנרגיה מסווג את ההשפעות הסביבתיות של אנרגיה גיאותרמית על-פי האופן שבו אנרגיה גיאותרמית מנוצלת או האופן שבו היא מומרת לאנרגיה שימושית. יישומים לשימוש ישיר ומשאבות חום

גיאותרמיות כמעט ואינם משפיעים על הסביבה. למעשה, הם יכולים להשפיע לטובה על ידי הפחתת השימוש במקורות אנרגיה חלופיים שהם בעלי השפעה שלילית על הסביבה.

תחנות כוח גיאותרמיות אינן שורפות דלק כדי לייצר חשמל, אך הן עשויות לשחרר כמויות קטנות של גופרית דו-חמצנית ופחמן דו-חמצני. תחנות כוח גיאותרמיות פולטות 97% פחות תרכובות גופרית הגורמות לגשם חומצי וכ-99% פחות פחמן דו-חמצני בהשוואה לתחנות כוח המופעלות בגז או נפט במתקן בגודל דומה. תחנות כוח גיאותרמיות משתמשות במכונות ניקוי כדי להסיר את המימן הגופרתי המצוי באופן טבעי במאגרים גיאותרמיים. רוב תחנות הכוח הגיאותרמיות מזריקות את הקיטור והמים הגיאותרמיים שבהם נעשה שימוש בחזרה לכדור הארץ. מחזור זה מסייע בחידוש המשאב הגיאותרמי ובהפחתת פליטות מתחנות הכוח הגיאותרמיות.

בנוסף, מאחר ומשאבים גיאותרמיים נמצאים באתרי תיירות כדוגמת ילוסטון, מודגשת החשיבות בהקמת מתקנים באופן שלא יפגע בערכי נוף או תיירות.

קידוחים גיאותרמיים בים מנוהלים על ידי המשרד לניהול משאבי החוף שבמשרד לענייני האוקיאנוס והאטמוספירה (National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA) [12]. המיקוד הוא בקידום של תהליכים סגורים שההשפעה שלהם על המערכות הימיות היא מינימאלית.

בהתאם לכך, המשרד להגנת הסביבה (EPA-Environmental Protection Agency) מפרסם הנחיות לבקרת זיהום בתהליכי פיתוח של אנרגיה גיאותרמית, כולל מסמכים טכניים על ניטור מי תהום, עידוד פיתוח אנרגיה מתחדשת על אדמות מזהמות, תקנות איכות אוויר וניהול פסולת. רוב ההנחיות הן משנות השמונים, עם עדכונים ודוגמאות רלוונטיות של הערכות השפעה על הסביבה (EIA) מהשנים האחרונות [47], כולל הנחיות מעודכנות לניתוח מחזור חיים [18].

המשרד לטכנולוגיות גיאותרמיות (GTO- Geothermal Technologies Office) בארה"ב ביצע EIA כדי לנתח את ההשפעות הסביבתיות הקשורות לשימוש במים, פליטות גזי חממה ורגישות סיסמית בארה"ב. המסקנות נכתבו על ידי צוות חוקרים בהובלת המעבדה הלאומית לאנרגיה מתחדשת (NREL - National Renewable Energy Laboratory) [16], התמקדו בניתוח חלופות בהסתמך על נתונים מהשנים 2009-2014, והדגישו את היתרון של אנרגיה גיאותרמית בהשוואה לחלופות, בפרט עם החדשנות הצפויה בטכנולוגיות הגיאותרמיות.

• איסלנד [15]

התקנות לאנרגיה גיאותרמית באיסלנד דורשות הערכת השפעה על הסביבה (EIA) עבור תחנות כוח חדשות ומתקדדות בשימוש בר-קיימא במשאבים באמצעות רישוי על ידי רשות האנרגיה הלאומית (Orkustofnun/NEA- National Energy Authority).

היבטים מרכזיים נוספים כוללים הגנה על מאפיינים טבעיים כמו מעיינות, דרישה להיתרים לחיפוש וניצול, וקביעת מגבלת שימוש על ידי בעלי קרקעות עבור פעילות בקנה מידה קטן ללא היתר (לדוגמה, שימוש במים חמים בתעשייה ובחקלאות או חימום מבנים).

רשות האנרגיה עובדת בשיתוף פעולה הדוק עם גופים ציבוריים אחרים המעורבים בשימוש באנרגיה גיאותרמית ובבנייה הקשורה אליה.

הסוכנות הסביבתית של איסלנד והמכון האיסלנדי להיסטוריה של הטבע ממלאים תפקיד חשוב ברגולציה, לדוגמה במתן ביקורת לבקשות לרישיונות גיאותרמיים שמוגשים ל-NEA, בפרט משום שאזורים גיאותרמיים רבים מוגנים חלקית או באופן מלא. רשויות מקומיות אחראיות על תכנון מקומי ומתן היתרי בנייה, וסוכנות התכנון הלאומית מטפלת בענייני הערכת השפעה על הסביבה ותכנון.

קיים גם שיתוף פעולה עם חברות אנרגיה ותשתיות והאגודה שלהן Samorka, עם אשכול האנרגיה המתחדשת של איסלנד, ועם GEORG, אשכול מחקר בתחום האנרגיה הגיאותרמית. כמו כן ה-NEA חברה בפרויקט הקידוחים העמוקים של איסלנד - IDDP מאז תחילתו.

לאחרונה הוקם משרד משותף לאנרגיה, סביבה ואקלים [29].

• **ניו זילנד [30, 31]**

ניו זילנד מיישמת רגולציה באמצעות חקיקה, והחוקים העיקריים הם חוק ניהול המשאבים משנת 1991 ותקנות האנרגיה הגיאותרמית משנת 1961.

חוק ניהול המשאבים, הוא חוק ניהול הסביבה העיקרי, המפקח על השימוש במשאבים ומסדיר את השימוש במשאבים גיאותרמיים. החוק נחשב באיגוד האנרגיה הגיאותרמית כגורם מרכזי לעיכובים ארוכים ולעלויות גבוהות של פרויקטים גיאותרמיים.

תקנות האנרגיה הגיאותרמית מפרטות תקני בטיחות ובנייה עבור קידוחים גיאותרמיים, כולל סטנדרטים לבניית קידוח, שימוש בצינורות עומדים ושסתומי ראש-באר, הצורך בצידוד קירור ואטימה נאותים לפני תחילת הקידוח, דרישות לשליטה בלחצים תת-קרקעיים, דרישות בטון לשרשראות ציפוי, נהלים לבקשות ותפקידו של פקח גיאותרמי.

תקנות אחרות כוללות את חובת הדיווח על פליטות בהתאם לחוק האקלים [32], חוק הבריאות והבטיחות בעבודה משנת 2015, חקיקה ספציפית עבור אזורים מסוימים כדוגמת רוטורואה (אזור תיירות עמוס באתרים גיאותרמיים), והקלות בחקיקה עבור שימושים ישירים המים החמים – בתעשייה, בחקלאות, בתיירות ובמבנים [33].

• **קוסטה ריקה [34]**

תקנות הסביבה נקבעות במשרד הסביבה והאנרגיה (MINAE- Ministry of Environment and Energy). חסרה מסגרת רגולטורית ארצית מקיפה, וקיימת הצעת חוק שתספק התייחסות לשיקולים סביבתיים עבור משאבים גיאותרמיים בעלי אנרגיה וטמפרטורה גבוהה ונמוכה כאחד. החוק יהיה רלוונטי לפרויקטים עתידיים ולמתקנים קיימים. כמו כן, התקנה לשימוש ישיר במשאבים גיאותרמיים פורסמה להתייחסות של בעלי עניין ולניתוח היבטי קיימות [35].

• **ישראל [42, 41, 48]**

בישראל טרם חוקקו תקנות לאנרגיה גיאותרמית, אבל קיימים חוק למקורות אנרגיה, חוק להגנת הסביבה, מפל"ס וחוק הפיקוח על קידוחי מים.

אישור לקידוח מים דורש הגשה של בקשה להיתר קידוח, דיון בוועדה, קבלת רישיון קידוח, מעקב אחרי היישום ובחינה של דגימות ראשונות לאחר הקידוח [36, 49]. כמו כן, בתחום הפליטות מאנרגיה, קיים מתווה לאיפוס פליטות גזי חממה (נטו) ממגזר האנרגיה בישראל עד לשנת 2050 [37]. כדי לעמוד ביעדים, קיימת חובה לדווח על פליטות מכל מתקן [8] ולהשקיע בטכנולוגיות שימצעו פליטה של גזי חממה ומזהמים.

בנוגע לסיכון הסיסמולוגי, קיים מודל להערכת סיכון שפיתח משרד השיכון עבור מבנים, אך הוא לא כולל התייחסות לקידוחים [38].

קידוחים גיאותרמיים קיימים לאחרונה גם בים, ולפיכך תקנות והמלצות מתאימות פורטו במסמך העדכני של אנרג'יקום [39].

5.2 משתנים שמשפיעים על הפליטות ממתקן גיאותרמי

לצורך איסוף המידע הנדרש להבנת העלות הסביבתית עקב פליטות חשוב לדעת מראש את המשתנים הבאים, בהתאם לניתוח מחזור חיים:

1. מאפייני המשאב הגיאותרמי:
 - השלב העיקרי לפליטת גזים:

הנוזל הגיאותרמי במאגר מסווג לפי הפאזה הדומיננטית שלו, ובדרך כלל, מאגרים בטמפרטורה נמוכה נמצאים בפאזה נוזלית אחת, בעוד שמאגרים בטמפרטורה גבוהה יכולים להיות בפאזה נוזלית או אדים. הפאזה הדומיננטית משפיעה על ריכוזי הגז בנוזל מכיוון שגזים שאינם מתעבים (NCGs) נוטים להיות נוכחים יותר ומעורבים עם אדים בפאזה גזית. לפיכך, מאגרים הנשלטים על ידי אדים הם בעלי פוטנציאל גבוה יותר לפליטת גזים.
 - תכולת והרכב הגז הנפלט – גזי חממה:

גזים שאינם ניתנים לעיבוי (NCGs) מופיעים באופן טבעי בנוזלים גיאותרמיים בתכולה והרכב שונים. ריכוזי NCG אופייניים נעים בין 0.2% ל-25% מהקיטור, כאשר CO₂ (שהוא גז-חממה) הוא בדרך כלל הגז הנפוץ ביותר. תכולת ה-NCGs משפיעה על טכנולוגיית הייצור, מערכת הקירור ויכולות הזרקה חוזרת של נוזלים. ואכן, ריכוזי גז גבוהים עלולים לגרום לתופעות של סילוק גזים, המובילות לפליטות ישירות של גז גיאותרמי לאטמוספירה.
 - עומק המערכת - הלחץ והטמפרטורה של המאגר:

הלחץ והטמפרטורה משפיעים על מסיסות המינרלים במשאב הנוזלי הגיאותרמי, וכתוצאה מכך על הרכבו ועל חלוקת הגזים בפאזה של אדים. עומק המאגר משפיע גם על דרישות הדלק והחומרים (למשל, מלט) לקידוח ולהשלמת הבארות, עם השפעה על פליטות עקיפות. עומקים אופייניים נעים בין 2.5 ל-4 ק"מ.
 - אופי המערכת ההידרותרמית - עם או בלי גירוי:

מערכות גיאותרמיות טבעיות ידועות כהידרותרמיות ומאופיינות בזמינות מקומית של נוזל שמהווה את המשאב במערכת. מערכות EGS הן מערכות גיאותרמיות שבהן מאגר בעל חדירות טבעית נמוכה אינו מאפשר שימוש תעשייתי. לכן, מערכות EGS עושות שימוש נרחב בטכניקות גירוי כדי לפתח את דפוסי הנקבוביות/שברים המתאימים ולהגביר את זרימת הנוזלים במקרים אלה כדי להגיע לתנאי הפעלה תעשייתיים. ניתן לבצע גירוי גם במערכות ההידרותרמיות כדי לשפר את החדירות או לשחזר את מאפייני הבאר המקוריים שייתכן שפחתו עקב סתימה עקב מינרליזציה של מלחים.
2. מאפייני הטכנולוגיה להפקת אנרגיה
 - שימוש בזרימת נוזלים (זרימה עצמית, שאיבה, העלאת גז):

על מנת להמיר אנרגיה גיאותרמית יש צורך להעלות את הנוזל הגיאותרמי אל פני השטח. זה יכול לקרות באופן ספונטני עקב הפרש לחצים בין המאגר לפתח התחנה (זרימה עצמית, באר ארטזית) או באמצעות משאבות. במקרים מסוימים, השימוש במשאבות יכול לסייע גם במניעה של שחרור גזים לאטמוספירה.
 - הטכנולוגיה להמרת אנרגיה:

בתחנות כוח גיאותרמיות, ניתן לייצר חשמל מהנוזל הגיאותרמי באמצעות טורבינה שממירה אנרגיה תרמודינמית לחום-כוח-חשמל. הנוזל הנשלח לטורבינה יכול להיות הנוזל הגיאותרמי המופק מהאדמה (מערכת ישירה) או נוזל חלופי המחומם על ידי התווך הגיאותרמי דרך מחליף חום (מערכת בינארית). כך ניתן לקבל מחזור רנקין אורגני (ORC),

או השבת חום. שלוש הטכנולוגיות הגיאותרמיות הקונבנציונליות הנפוצות ביותר לאספקת אנרגיה הן (1) מערכות קיטור יבש – מערכת ישירה; (2) מערכות פלאש, יחידה או מרובות (ישירות); ו-(3) מערכות בינאריות.

- מערכת קירור - מקררי אוויר או מגדלי קירור רטובים:
בדרך כלל מערכת קירור דורשת מקור מים חיצוני (מהים או ממשאב נהר גדול מתאים), אך מכיוון שמתקנים גיאותרמיים נמצאים לעתים קרובות במקומות בהם אין זמינות ניכרת של משאבי מי קירור טבעיים, נוזל גיאותרמי ממוחזר (מעובה) משמש לעתים למטרות קירור. טכנולוגיה זו נפוצה ביותר בתחנות כוח במחזור ישיר (קיטור יבש או פלאש). חיסרון אפשרי הוא פליטה לאוויר של תרכובות כימיות המומסות בנוזל הגיאותרמי יחד עם אדי המים הנובעים מתהליך הקירור, המהווים מקור פוטנציאלי לזיהום. לחלופין, מצנן אוויר משתמש במחליפי חום המקוררים על ידי אוויר סביבתי עם מעגל נפרד לחלוטין כך שהנוזל אינו פוגש את האטמוספירה וניתן להימנע מכל הפליטות. במקרה זה, החיסרון העיקרי הוא תפוסת הקרקע גדולה יותר של מחליף החום.

- מערכת להפחתת פליטות:
על מנת להפחית פליטות מזהמים, ניתן להשתמש במערכות להפחתת פליטות בתחנות כוח גיאותרמיות באמצעות הפחתה של מימן גופרתי וכספית, שהם המזהמים הנפוצים ביותר; דוגמה, שפותחה במיוחד עבור יישומים גיאותרמיים, היא תהליך ©AMIS1, שהוא יעיל מאוד בהפחתת פליטות של כספית גזית ומימן גופרתי.
- הזרקה חוזרת (נוזל, נוזל + NCG):
הזרקה חוזרת לתוך מאגר גיאותרמי של נוזלים גיאותרמיים מאפשרת להאריך את חיי המאגר ולשפר את הביצועים הסביבתיים של המערכת. ניתן להאריך את חיי המאגר כמעט ללא סוף, כלומר בפועל עד להתרוקנות מקור החום המקומי, שהוא בדרך כלל אורך חיים ארוך מאוד. מחקרי היתכנות מבוססים בדרך כלל על אורך חיים של 30 שנה. מסיבה זו, אנרגיה גיאותרמית נחשבת למשאב מתחדש. כיום, הפאזה הנוזלית מוזרקת חלקית או מלאה כמעט בכל הפרויקטים הגיאותרמיים. הזרקה חוזרת של NCG, לעומת זאת, היא פתרון שנמצא בפיתוח עבור תחנות אנרגיה מהירות, אך די נפוץ בתחנות בינאריות או תחנות חום, הדורש פתרונות ספציפיים.

3. מאפייני התפעול של המערכת

- ייצור חשמל - הספק הייצור של המפעל
- אופי הייצור - בהתאם ללחץ הקיטור במערכת וטמפרטורת הזנה והחזרה
- לייצור מים חמים, בהתאם לטמפרטורת ההזנה וההחזרה של המערכת.
- דעיכת תפוקת אנרגיה:
פרמטר זה מכמת את הירידה הצפויה בתפוקת האנרגיה לשנה. ניתן לבטא אותה כאובדן של אחוז מסך תפוקת האנרגיה. מומלץ להשתמש בדעיכה תרמית של 2.5% על פני 30 שנה. אם לא מתחשבים בדעיכת תפוקת אנרגיה, יש לכלול קידוח בארות נוספות במלאי הקשור לבארות לאורך כל אורך החיים.
- אורך חיים תפעולי:
יש לקחת בחשבון מספר תקופות שונות עבור המתקן הגיאותרמי לאורך כל מחזור חייו.

6. מקורות

- [1] EU, "Geothermal Energy," EU, 2020. [מקוון]. Available: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/geothermal-energy_en.
- [2] Intelligent Energy - Europe, "Geothermal Regulation Framework," 2009. [מקוון]. Available: http://www.geoelec.eu/wp-content/uploads/2012/11/GTRH_final_Framework_Nov09.pdf.
- [3] N. Wetzler, E. Shalev, T. Göbel, F. Amelung, I. Kurzon, V. Lyakhovsky ו E. Brodsky, "Earthquake Swarms Triggered by Groundwater Extraction Near the Dead Sea Fault", *Geophysical research letters*, 14 מס', 46, כרך, pp. 8056-8063, 2019.
- [4] I. Blanc, D. Damen, M. Douziech, D. Fiaschi, V. Harcouët-Menou, G. Manfrida, B. Mendecka, M. Parisi, P. Perez Lopez, G. Ravier ו T. L., "First version of harmonized guidelines to perform environmental assessment for geothermal systems based on LCA and non LCA impact indicators: LCA Guidelines for Geothermal Installations," GEOENVI, 2020.
- [5] א. ששינסקי ו י. מרגליות, "המלצה לאימוץ מס פחמן בישראל – כלי חיוני להפחתת פליטות ולהתמודדות עם משבר האקלים," אקולוגיה וסביבה, כרך 15, מס' 3, 2024, pp. 14-18.
- [6] Available: https://www.gov.il/he/departments/topics/reducing_air_pollution/govil-landing-page. [מקוון]. GOV.IL, 2025. "איכות אוויר", המשרד להגנת הסביבה.
- [7] ה. זר-אביב, "עלויות חיצוניות של זיהומי מים בישראל," מרכז מילקן, 2020.
- [8] GOV.IL, 2025. "שיטות לחישוב פליטות והעברות לסביבה במפל"ס", [מקוון]. Available: https://www.gov.il/he/pages/calculation_methodology.
- [9] EU, "חוק האקלים האירופאי," EU, 2021. [מקוון]. Available: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en.
- [10] NREL, "Next-Generation Geothermal," NREL, 2025. [מקוון]. Available: <https://www.nrel.gov/geothermal/next-generation>.
- [11] IRENA, "OCEAN THERMAL ENERGY CONVERSION - TECHNOLOGY BRIEF," IRENA, 2014. Available: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2014/Ocean_Thermal_Energy_V4_web.pdf. [מקוון].

- [12] Office for coastal management, "Ocean Thermal Energy Conversion," NOAA, 2025 .
[מקוון] Available: <https://coast.noaa.gov/czm/thermalenergy/>
- [13] J. Li, R. Tarpani, A. Gallego-Schmid I L. Stamford, "Life cycle assessment of repurposing abandoned onshore oil and gas wells for geothermal power generation ", *Science of The Total Environment* .2024 ,167843 חס' 907 , כרך ,
- [14] EGEC, "Environmental legislation," EGEC, 2025 .[מקוון] Available:
<https://www.egec.org/area/environmental-legislation/>
- [15] Orkustofnun, "Geothermal," Orkustofnun, 2023 .[מקוון] Available:
https://orkustofnun.is/en/natural_resources/geothermal_energy.
- [16] NREL, "GeoVision Analysis Supporting Task Force Report: Impacts," NREL, 2019 .[מקוון] .
Available: <https://docs.nrel.gov/docs/fy19osti/71933.pdf>.
- [17] .EIA, "Geothermal explained - Geothermal energy and the environment," EIA.GOV, 2022
Available: <https://www.eia.gov/energyexplained/geothermal/geothermal-energy-and-the-environment.php> .[מקוון]
- [18] .EPA, "Federal LCA Commons Elementary Flow List for Life Cycle Assessment," EPA, 2022
Available: https://sor.epa.gov/sor_internet/registry/termreg/searchandretrieve/glossariesandkeyw.vocabName=FEDEFL&=ordlists/search.do?details .[מקוון]
- [19] Technology Park," & Natural Energy Laboratory of Hawaii, "Hawaii Ocean Science
Hawaii.Gov, 2025 .[מקוון] Available: <https://nelha.hawaii.gov/energy-portfolio> .
- [20] JOGMEC, "GEOTHERMAL-Collection and provision of information," JOGMEC, 2022 .
[מקוון] Available: https://www.jogmec.go.jp/english/geothermal/geothermal_10_000005.html.
- [21] GO.JP, "Environmental Checklist: 4. Geothermal Power Station," GO.JP, 2025 .[מקוון] .
Available:
https://www.jica.go.jp/Resource/english/our_work/social_environmental/guideline/pdf/ist4.pdf.
- [22] S. Matsudaira I N. Mori, "Renewable Energy Laws and Regulations Japan 2026 -ב ",
Renewable Energy Laws and Regulations ,ICLG, 2025 .
- [23] PROFOR, "RAPID ENVIRONMENTAL AND SOCIAL ASSESSMENT OF GEOTHERMAL
DEVELOPMENT IN CONSERVATION FOREST AREAS IN INDONESIA," 2019 .[מקוון]

Available:

https://ksdae.or.id/assets/publikasi/PROFOR_Geothermal%20Indonesia%20Report%20P.lus%20CALLOUT+Disclaimer%20FLAT.pdf

- [24] RECOURSE, "EXPLORING GEOTHERMAL ENERGY DEVELOPMENT IN INDONESIA: Policy Failures and Impacts on Women's Rights," 2023 course.org/wp-content/uploads/2023/09/Exploring-Geothermal-Energy-Development-in-Indonesia.pdf .[מקור]
- [25] AsiaPacificEnergy, "INDONESIA: Law of the Republic of Indonesia No. 21 of 2014 about Geothermal," 2014 .[מקור] .Available: https://policy.asiapacificenergy.org/node/3024#:~:text=The%20law's%20aims%20include%20*%20Reducing%20greenhouse,hazards%2C%20pollution%2C%20and%20destruction%20of%20the%20environment.
- [26] UK AIR, "UK Air Quality Policy Context," GOV.UK, 2025 .[מקור] .Available: <https://uk-air.defra.gov.uk/air-pollution/uk-policy-context>.
- [27] UK GOV, "Future of the subsurface: geothermal energy generation in the UK (annex)," GOV.UK, 2024 .[מקור] .Available: <https://www.gov.uk/government/publications/future-of-the-subsurface-report/future-of-the-subsurface-geothermal-energy-generation-in-the-uk-annex>.
- [28] BGS, "BGS geothermal energy research," AC.UK, 2025 .[מקור] .Available: <https://www.bgs.ac.uk/geology-projects/geothermal-energy/applications/>
- [29] GOV.IS, "Ministry of the Environment, Energy and Climate," GOV.IS, 2025 .[מקור] .Available: <https://www.government.is/ministries/ministry-of-the-environment-energy-and-climate/>
- [30] NZ, "Geothermal Energy Regulations 1961," GOVT.NZ, 1961 .[מקור] .Available: <https://www.legislation.govt.nz/regulation/public/1961/0124/latest/DLM16209.html>.
- [31] NZ, "Resource Management Act 1991," GOVT.NZ, 1991 .[מקור] .Available: <https://www.legislation.govt.nz/act/public/1991/0069/latest/DLM230265.html>.
- [32] NZ Ministry for the Environment, "Guide to Reporting for Geothermal Fluid Activities under the New Zealand Emissions Trading Scheme," GOVT.NZ, 2009 .[מקור] .Available: <https://environment.govt.nz/assets/Publications/Files/seip-reporting-guidance-geothermal-fluid.pdf>.

- [33] NZ Ministry of business, Innovation and Employment, "What is geothermal and how is it important to New Zealand?," GOVT.NZ, 2024. [מקוון]. Available: <https://www.mbie.govt.nz/building-and-energy/energy-and-natural-resources/minerals-and-petroleum/strategies/consultation-document-from-the-ground-up-a-draft-strategy-to-unlock-new-zealands-geothermal-potential/what-is-geothermal-and-how-is-it-important-to>.
- [34] MINAE, "What is MINAE?," GO.CR, 2023. [מקוון]. Available: <https://www.minae.go.cr/>
- [35] ThingGeoEnergy, "Costa Rica submits geothermal direct use legislation for consultation," ThingGeoEnergy, 2021. [מקוון]. Available: <https://www.thinkgeoenergy.com/costa-rica-submits-geothermal-direct-use-legislation-for-consultation/>
- [36] רשות המים - חטיבת אסדרה, "פרוטוקול מסכם בנושא וועדת קידוחים 03.04.2024", 2024. [מקוון]. Available: <https://www.gov.il/BlobFolder/reports/comittee-summaries/he%20קידוחים%20ועדת%20פרוטוקול4.3.2024.pdf>
- [37] משרד האנרגיה, "מתווה לאיפוס פליטות גזי חממה (נטו) ממגזר האנרגיה בישראל עד לשנת 2050", 2025. [מקוון]. Available: <https://www.gov.il/he/pages/energy-2050>
- [38] מ. דייזיס ו א. דור, "פיתוח מודל סיסמוטקטוני ליישום בהערכה של סיכונים סיסמיים בישראל", 2014.
- [39] א. דרויאן, "תשתיות ואנרגיה מתחדשת במרחב הימי של ישראל - סקירה רגולטורית", אנרג'יקום, 2025.
- [40] משרד האנרגיה, "תזכיר חוק מקורות אנרגיה (תיקון), התשפ"ד - 2024", GOV.IL, 2024. [מקוון]. Available: <https://www.tazkirim.gov.il/s/detail/a133Y00000K4jqtQAB>
- [41] המשרד להגנת הסביבה, "חוק הגנת הסביבה (פליטות והעברות לסביבה – חובות דיווח ומרשם), התשע"ב-2012 ותקנות מתוקף החוק", 2019. GOV.IL. [מקוון]. Available: https://www.gov.il/he/pages/prtr_law_2012
- [42] המשרד להגנת הסביבה, "תסקירי השפעה על הסביבה", 2024. GOV.IL. [מקוון]. Available: https://www.gov.il/he/pages/environmental_impact_assessments?chapterIndex=3
- [43] C. Zuffi, G. Manfrida, F. Asdrubali ו L. Talluri, "Life cycle assessment of geothermal power plants: A comparison with other energy conversion technologies ", *Geothermics*, 104, כרך , מס' 102434, 2022.

- [44] M. Milousi, A. Pappas, A. Vouras, G. Mihalakakou, M. Souliotis I. S. Papaftimiou, "Evaluating the Technical and Environmental Capabilities of Geothermal Systems through Life Cycle Assessment ", *Energies* .2022 ,5673 מס' 15(15), כרך ,
- [45] Argonne National Laboratory, "GREET," 2022 .[מקוון]. Available: <https://greet.anl.gov/files/greet-model>.
- [46] Environment Agency, "Deep geothermal energy regulation," GOV.UK, 2014 .[מקוון]. Available: <https://www.gov.uk/guidance/deep-geothermal-energy-regulation>.
- [47] EPA, "Environmental Topics," EPA, 2025 .[מקוון]. Available: https://search.epa.gov/epasearch/?querytext=GEOTHERMAL&areaname=&=areacontact&=areasearchurl&=typeofsearch=epa&result_template./#=
- [48] Available: .[מקוון]. GOV.IL, 2017 "התשט"ו-1955, חוק הפיקוח על קידוחי מים, הכנסת, s&https://main.knesset.gov.il/activity/legislation/laws/pages/lawprimary.aspx?t=lawlaws .lawitemid=2000501&t=lawlaws
- [49] א. רביב ו א. אילון, "אנרגיה גיאותרמית - פורום בנושא יישום אפשרי בגולן," 2025 .[מקוון]. Available: <https://www.neaman.org.il/geothermal-energy-the-application-potential-at-the-golan-heights>.
- [50] VRCOOLER, "מהן הטכנולוגיות הלא שגרתיות של שחזור חום פסולת בתחנות כח?," 2023 .[מקוון]. Available: [https://il.vrcoolerar.com/news/what-are-the-unconventional-techniques-of-wast-70113208.html#:~:text=%D7%9E%D7%97%D7%96%D7%95%D7%A8%20%D7%A8%D7%A0%D7%A7%D7%99%D7%9F%20%D7%90%D7%95%D7%A8%D7%92%D7%A0%D7%99%20\(ORC\):%20%D7%9E%D7%97%D7%96%D7%95%D7%A8%20%D7%A8%D7](https://il.vrcoolerar.com/news/what-are-the-unconventional-techniques-of-wast-70113208.html#:~:text=%D7%9E%D7%97%D7%96%D7%95%D7%A8%20%D7%A8%D7%A0%D7%A7%D7%99%D7%9F%20%D7%90%D7%95%D7%A8%D7%92%D7%A0%D7%99%20(ORC):%20%D7%9E%D7%97%D7%96%D7%95%D7%A8%20%D7%A8%D7)



neaman.org.il