



בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה

כתיבה: רועי גולדשמידט ואהוד בקר | אישור: שירי ספקטור בן ארי

תאריך: ו' בחשוון תשפ"ה, 7 בנובמבר 2024

סקירה

תוכן העניינים

1.....	תמצית
4.....	רקע
4.....	1. בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה: הזדמנויות ואתגרים
5.....	1.1 התרומה האפשרית של כלי AI באופטימיזציה בתחום האנרגיה
8.....	1.2 אתגרים בהטמעה ושימוש בבינה מלאכותית בתחום האנרגיה
8.....	1.2.1 התמודדות עם החשש להטיות ואפליה
9.....	1.2.2 סיכוני אבטחה ביישום כלי AI
11.....	1.2.3 גישה למידע ונתונים
12.....	2. הטמעת בינה מלאכותית במשק החשמל בישראל
12.....	2.1 משרד האנרגיה והתשתיות
13.....	2.2 רשות החשמל
13.....	2.3 חברת נגה – ניהול מערכת החשמל
14.....	2.4 חברת החשמל
15.....	3. צריכת החשמל של תשתיות בינה מלאכותית
15.....	3.1 צריכת החשמל של חוות שרתים
18.....	3.2 ההשפעה הסביבתית של הגידול בצריכת החשמל
19.....	3.3 צעדי מדיניות הננקטים על ידי מדינות וגופים בין לאומיים: דוגמאות
25.....	3.4 צריכת החשמל של "חוות שרתים" והשפעתה על משק האנרגיה בישראל
26.....	3.4.1 תחזיות צריכת החשמל של חוות שרתים בישראל

תמצית

מסמך זה נכתב לבקשת חה"כ אורית פרקש הכהן לקראת דיון ועדת המשנה של ועדת המדע והטכנולוגיה לבינה מלאכותית וטכנולוגיות מתקדמות. המסמך מציג בקצרה את הפוטנציאל של טכנולוגיות בינה מלאכותית לתרום ליעול ייצור ואספקה של אנרגיה ואת האתגרים והסיכונים בהטמעה של בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה. בנוסף, נסקרת השפעת התפתחותם ותפוצתם של כלי בינה מלאכותית יוצרת, אימון מודלי בסיס ומרכזי הנתונים (Data Centers - להלן חוות שרתים) על הביקוש לאנרגיה בישראל ובמדינות שונות בעולם.

בניגוד למערכת החשמל בעבר שהתאפיינה כמערכת חד-סטריית של ייצור, הולכה והפצה, מערכת החשמל כיום מתאפיינת ברב-כיוונית כאשר אותם שחקנים יכולים לצרוך, לאגור או לייצר חשמל, ממקורות שונים, בזמנים שונים. השינוי האמור במאפייני המערכת מדגיש את הצורך בנתונים ובמידע רציף ומפורט על פעילותה כדי לקבל החלטות על אופני התפעול, התחזוקה והאופטימיזציה של ביצועיה.

לפי דוח משרד האנרגיה של ארה"ב (2024) טכנולוגיות ושיטות מתחומי הבינה המלאכותית יכולות לתרום להתפתחות משק האנרגיה ויעולו בהיבטים שונים, ובהם: תכנון הרשת, הערכה דינמית של פעולתה בזמן אמת; סיוע בתהליכי הנפקת היתרים וקביעת אתרים למתקני חשמל; שיפור החיזוי של אנרגיות מתחדשות ושל ביקושים; סיוע בתמחור זמן אמת של אנרגיה; שיפור יכולת ניטור הרשת וזיהוי אנומליות; סיוע בפיתוח הדמיות שונות ועוד. כך לדוגמה, כלי AI יכולים לשמש לחיזוי מתקדם ומדויק של מזג האוויר; לחיזוי ביקושים לאנרגיה; לתחזוקה צופת פני עתיד של אתרי ייצור או קווי אספקה; להגנה מתקדמת מפני מתקפות סייבר ועוד.

עם זאת, **לפי הדוח יש לאמץ עקרונות לשימוש נכון בכלי בינה מלאכותית במגזר האנרגיה** בהם: הליכי אימות ותיקוף קפדניים של המערכות; יכולת הסבר של החלטות מכונה; מעורבות אנושית ופיקוח על החלטות מכונה; התאמת המערכות לעבודה בהיקפים גדולים (Scalability) ועמידה בסטנדרטים מחמירים של בטיחות סייבר ועיצוב מתואם אתית. בנוסף, יש להתמודד עם אתגרים שונים של מערכות בינה מלאכותית בהם: החשש מהטיה או אפליה; סיכוני אבטחה של השימוש בכלי AI; סיכוני פרטיות ועוד.

ביוני 2023 פרסם המדען הראשי במשרד האנרגיה בישראל כי שר האנרגיה הקים "ועדה שתמפה את התחומים בהם ניתן לשלב AI לצורך שיפור ביצועים במשק האנרגיה ותציע דרכים לסייע במחקר כדי לקדם במהירות פתרונות בתחומים החשובים למשק האנרגיה". בהמשך שנת 2023 פרש מתפקידו המדען הראשי במשרד. עד כה טרם מונה לו מחליף והוועדה האמורה לא החלה בפעילותה.

לפי חברת נגה – ניהול מערכת החשמל, השימוש ב-AI מייצר אתגרים שונים לחברה המנהלת תשתית מדינה קריטית כמו תשתית החשמל ובהם סוגיות כמו הגנת הפרטיות, אבטחת מידע, גישה למידע ועוד. בהינתן מגבלות אלה, **החברה עושה שימוש, בתחומים רגישים פחות של פעילותה, בתוכנות מדף קיימות, במודלים שונים מבוססי Open Source – I Machine Learning לצורך טיוב פעילויות שבתחום אחריותה, לרבות שיפור אמצעי החיזוי למזג האוויר ומאפיינים מטאורולוגיים אחרים וליקושים לחשמל, ופועלת להרחיב את פעילותה בשימוש בכלי בינה מלאכותית.**

נציג חברת החשמל ציין כי החברה עושה שימוש בכלי AI **לצרכים פנים ארגוניים** כגון רכש, ניהול מלאים ועוד; **לצרכי תפעול של ייצור חשמל** – במסגרת זו הקימו מרכז לניטור תחזוקה חזויה ואופטימיזציה תהליכים; **לתכנון ופיתוח רשת החשמל** – בכלל זה פיילוטם בתחום ניטור הרשת ופיתוח תאום דיגיטלי לצרכי סימולציות; ומשקיעה בחברות הפועלות בתחומי הדיפ-טק של **טכנולוגיות אנרגיה עתידיות** – בהן המורכבות החישובית תחייב שימוש בכלי בינה מלאכותית להדמיה ולתפעול.

הביקוש לאנרגיה עבור תשתיות בינה מלאכותית וחוות שרתים

כלי בינה מלאכותית דורשים יותר חשמל משירותים מקוונים אחרים – **שאילתה באמצעות כלי AI דורשת פי עשרה יותר חשמל מחיפוש ב-Google, למשל, ויצירת תמונה או וידאו דורשים עשרות מונים יותר**. מערכות הבינה המלאכותית הצורכות את החשמל מופעלות בחוות שרתים (Data Centers), המאחסנות מערכות ממוחשבות שונות. מרבית השימוש בחוות השרתים הוא לצרכים אחרים מבינה מלאכותית (אחסון ענן, כריית מטבעות קריפטוגרפיים ועוד), אך השימוש בבינה המלאכותית צפוי לגדול בשנים הקרובות ולתרום לגידול בצריכת החשמל של חוות שרתים. נכון לשנת 2022, חוות שרתים צרכו כ-460 טרה-וואט שעה (TWh), **שהם כ-2% מסך צריכת החשמל בעולם**. לפי תחזיות, הצריכה צפויה לגדול עד שנת 2026 בשיעור שבין 35%-ו-128%.

שיעור צריכת החשמל של חוות שרתים משתנה ממדינה למדינה, אך מדובר בגורם משמעותי שיש להתייחס אליו בתכנון משק האנרגיה. לדוגמה, בארצות הברית צריכת החשמל של חוות השרתים היוותה כ-4% מכלל צריכת החשמל הלאומית, וצפויה לעלות בשנת 2026 ל-6%. לעומת זאת, באירלנד נכון לשנת 2022 צריכת החשמל של חוות שרתים היוותה כ-17% מכלל צריכת החשמל במדינה, ושיעור הצריכה של החוות צפוי לעלות ל-32% בשנת 2026.

העלייה בצרכי האנרגיה הביאה חברות טכנולוגיה שונות לחיפוש פתרונות להגדלת הספק החשמל של חוות השרתים, כמו בניית החוות בסמוך לתחנות כוח ואף פיתוח כורים גרעיניים קטנים וייעודיים לשימוש בחוות. מבחינה סביבתית, צריכת החשמל המשמעותית של החוות מובילה במקרים רבים לעלייה בפליטת גזי חממה ומזהמי אוויר אחרים (כתלות באופן ייצור החשמל), וגם מביאה להשלכות סביבתיות נוספות (כגון ייצור מוגבר של פסולת אלקטרונית). חברות טכנולוגיה גדולות (כמו Google ו-Amazon) המפתחות בינה מלאכותית, נדרשות לשקלל את צריכת האנרגיה של מערכות בינה מלאכותית בפרט וגידול הצורך בחוות שרתים בכלל במדיניות התאגידית החברתית-סביבתית שלהן (ESG). **מדינות וגופים בין לאומיים נוקטים בצעדי מדיניות שנועדו להידרש לגידול בצריכת החשמל הצפוי בשל גידול השימוש בבינה מלאכותית**. צעדי המדיניות יכולים לכלול התערבות ממשלתית "נוקשה" יותר, כמו קביעת תקנים מחייבים ליעילות אנרגטית, הקפאת הבנייה של חוות שרתים בזמן פיתוח כלים נוספים, ודרישת אישור ממשלתי להקמת או הפעלת חוות שרתים; או צעדים "רכים" יותר, כמו הסכמים התנדבותיים, תמריצים ממשלתיים ועוד. המסמך מפרט צעדים שנקטו במספר מדינות, בהן האיחוד האירופי, אירלנד, ארה"ב, סין, סינגפור, גרמניה, בריטניה, הולנד וצרפת.

הביקוש לאנרגיה מצד חוות שרתים בישראל

לפי חברת החשמל **הקמת חוות שרתים בישראל** חשובה כי הן מאפשרות אחסון מקומי, מהיר ובר קיימא של מידע הכרחי להפעלת שירותים גם במצבי קיצון ללא תלות בחיבור לסיב אופטי בחו"ל ומסייעות במניעת דלף מידע, והקמתן צפויה לתרום לתמ"ג להוסיף מקומות עבודה. לפי רשות החשמל חוות שרתים הן גם תשתית תומכת לצמיחת תעשיית ההיי-טק לרבות פיתוח יכולות בתחום הבינה המלאכותית.

בבחינת מאפייני צריכת האנרגיה של חוות שרתים בישראל, ניתן להתייחס לכמה היבטים: כמות האנרגיה הנצרכת, סוג החיבורים ופריסתם הגיאוגרפית. לפי רשות החשמל, ממיפוי היוזמות של חוות השרתים בישראל עד כה, עולה שמרבית החוות צפויות להתחבר לרשת המתח הגבוה, בהספקים של עד 16 מגה, וישנה מגמה לבקשת חיבורים גם במתח עליון.

מבחינת **הפריסה הגאוגרפית** של חוות השרתים, מנתוני חברת החשמל ורשות החשמל עולה כי המתקנים הקיימים והמתוכננים ממוקמים במספר מוקדים מרכזיים: שפלה, איילון, מודיעין, ירושלים, וחיפה. אזורים אלו הם גם **מוקדי צריכת החשמל בישראל כיום**, וגם מאופיינים במיעוט מקורות ייצור ולפיכך הם תלויים במידה רבה בפיתוח רשת החשמל. הרשות ציינה כי ההספק החזוי של לחיבור חוות שרתים בשנת 2030 **במחוז מרכז לבדו** הינו בהיקף של כ- 500 MW והוא שקול לחיבור של כ-125,000 יחידות דיור ולצריכת חשמל של כחצי מיליון צרכנים. לשם כך, נדרשת הקמה של חמש תחנות משנה חדשות, ומבחינת מקטע ייצור החשמל- מדובר על יכולת של כשליש מהמחז"מ הנוסף שאמור לקום בגוש דן עד 2030.

לפי תוכנית פיתוח רשת החלוקה של חברת החשמל תוספת ההספק החזויה עבור חוות שרתים עומדת על כ- MVA 1,312 (מגה וולט אמפר) עד לשנת 2030 (בתחזית מימוש של 65% מכלל ההזמנות). לפי האמור, ההספק המותקן הנדרש עבור חוות שרתים בשנת 2030 יהיה כ- 1207 MW. **בהינתן תחזיות הביקוש של חברת נגה לשנת 2030** (הנעות בין 18,153 לבין 19,563 MW בשעות שיא הביקוש) **המדובר ביותר מ-6% מכלל ההספק המותקן שיידרש באותה שנה בשעות השיא (בהשוואה להספק המותקן שהיווה בשנת 2023 פחות מ-1.5% מכלל ההספק המותקן הנדרש בשעות השיא).**

לפי טיוטת דוח של רשות החשמל יש לבחון את הצורך בהתערבות ממשלתית בתחום.

על פי נתוני חברת נגה בחלק ניכר מהמקרים לא מיצו מרכזי הנתונים את הספק החשמל המתוכנן בהם. כך, גודל חיבור חוות השרתים בישראל כיום הוא כ- 183 מגה וואלט אמפר (MVA) **אך בפועל הצריכה הכוללת שלהן בשיא העומס היא כ-50 מגה וואט (MW) בלבד. סך ההזמנות הכולל לחיבור חוות חדשות בשנים הבאות, לפי נגה, הוא כיום MVA 1,083¹.**

על פי רשות החדשנות, תחום הבינה המלאכותית נמצא עדיין בשלבים של התפתחות והשתנות מואצת ולכן **בשלב זה קשה מאוד לגבש תחזיות ארוכות טווח באשר לביקושים לאנרגיה מצד יישומים אלה**. לדברי נציג הרשות, יתכנו מגמות שונות שישפיעו בעתיד על היקף צריכת האנרגיה של חוות שרתים, בהן: גידול בשימוש בכלי בינה מלאכותית, שיפור היעילות האנרגטית של כלים אלה בעתיד, ותרחישים של אספקת צרכי החישוב העתידיים של התעשייה הישראלית באמצעות מרכזי נתונים הממוקמים בחו"ל.

רקע

מסמך זה נכתב לבקשת חה"כ אורית פרקש הכהן לקראת דיון ועדת המשנה של ועדת המדע והטכנולוגיה לבינה מלאכותית וטכנולוגיות מתקדמות. המסמך סוקר בקצרה את הפוטנציאל של טכנולוגיות בינה מלאכותית לתרום לייעול ייצור ואספקת אנרגיה ולמעבר לאנרגיה בת קיימא בישראל ובעולם, ואת האתגרים והסיכונים בהטמעה של בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה. בנוסף, המסמך מציג את נושא הביקוש לאנרגיה בישראל ובמדינות שונות בעולם בעקבות התפתחותם ותפוצתם של כלי בינה מלאכותית יוצרת, אימון מודלי בסיס והקמתם של מרכזי הנתונים (Data Centers).

1. בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה: הזדמנויות ואתגרים

בניגוד למערכת החשמל בעבר שהתאפיינה כמערכת חד-סטטית של ייצור, הולכה והפצה, מערכת החשמל כיום מתאפיינת ברב-כיוונית כאשר אותם שחקנים יכולים לצרוך, לאגור או לייצר חשמל, ממקורות שונים, בזמנים שונים. כדי לאפשר למנהלי המערכת (ואף ליצרנים ולצרכנים בה) לקבל החלטות על אופני התפעול, התחזוקה והאופטימיזציה של ביצועיה, יש צורך בנתונים ומידע (Data) רציף ומפורט על פעילותה.

גם טרם "מהפכת הבינה המלאכותית" של השנים האחרונות סקטור האנרגיה עסק בניהול, ניטור וקבלת החלטות, תוך ניסיונות לבסס את הפעילות שלו, לפחות בחלקה, על "נתוני עתק" או Big Data. זאת במקביל למגמות של הכנסתם של מונים חכמים וחיישנים (סנסורים) שונים במטרה לבדוק את תפקודן ותקינותן של מערכות הייצור, ההולכה וההפצה ואת דפוסי הצריכה. במובן זה, לא ברור האם נכון יותר לתאר את פוטנציאל החדירה של עולמות הבינה המלאכותית לסקטור האנרגיה כמהפכה או כאבולוציה. בין כך ובין כך, טכנולוגיות ושיטות מתחומי הבינה המלאכותית יכולות לתרום להתפתחות משק האנרגיה וייעולו בהיבטים שונים: חיזוי מתקדם ומדויק של מזג האוויר יכול לסייע בחיזוי ביקושים לאנרגיה לצד חיזוי ייצור האנרגיה הצפוי מקרני השמש, או ממקורות טבעיים אחרים. שימוש בכלי AI יכול לסייע בתחזוקה צופת פני עתיד של אתרי ייצור או קווי אספקה; תהליכי תכנון של אתרי ייצור או קווי הולכה והפצה של רשת החשמל יכולים להתייעל באמצעות שימוש במודלי AI או ב"תאומים דיגיטליים" (Digital twins)², ועוד.

להלן יוצגו כמה דוגמאות לשימושים אפשריים בכלי בינה מלאכותית לייעול ושיפור בהיבטי פעילות מסוימים של משק האנרגיה. הדוגמאות אינן ממצות כיוון שמספר התחומים שיכולים

¹ עו"ד נעם ברימן, היועץ המשפטי ומזכיר החברה, נגה- ניהול מערכת החשמל, דוא"ל מענה לפניית מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 5 בנובמבר 2024.

² תאומים דיגיטליים הוא מושג שנועד לתאר ייצוג וירטואלי של אובייקט או מערכת פיזית במטרה לשקף אותם במדויק, תוך עדכון בנתוני זמן אמת, שימוש בהדמיות, למידה והנמקה מבוססת מכונה כדי לסייע בקבלת החלטות.

IBM, "what is a Digital Twin", accessed: October 23th 2024.

בעוד שמערכת
החשמל בעבר
התאפיינה כמערכת
חד-סטטית של ייצור,
הולכה והפצה
מערכת החשמל כיום
מתאפיינת ברב-
כיוונית כאשר אותם
שחקנים יכולים
לצרוך, לאגור או
לייצר חשמל,
ממקורות שונים,
בזמנים שונים.

להפיק תועלת מיישומי AI, מיכולות חישוב על ומשיטות הניתוח ועיבוד הנתונים המקובלות בתחום, גדול מאוד.

1.1 התרומה האפשרית של כלי AI באופטימיזציה של מערכות האנרגיה

באוקטובר 2023 פרסם הבית הלבן צו נשיאותי בנושא "פיתוח ושימוש בטוח, מאובטח ואמין בבינה מלאכותית".³ בין השאר הצו הורה לשר האנרגיה (תוך היועצות עם סוכנויות ממשל נוספות) לפרסם דוח ציבורי שיתאר את הפוטנציאל של בינה מלאכותית לשיפור התכנון, הנפקת ההיתרים, ההשקעה הכלכלית והקמת תשתיות רשת החשמל (Grid), על מנת לאפשר אספקת חשמל נקי, בר השגה, אמין, עמיד בפני תקלות (Resilient) ובטוח לכלל האמריקאים. באפריל 2024 פרסם משרד האנרגיה של ארצות הברית דוח כאמור.⁴ הדוח מתמקד ברובו בארבעה תחומים עיקריים בהם ניתן להטמיע כלי בינה מלאכותית על מנת להשיג את המטרות האמורות לעיל: תכנון רשת החשמל; היתרים וקביעת אתרים (siting); תפעול ואמינות; וסבילות או יכולת התאוששות מתקלות. להלן יוצגו דוגמאות ליישום מן הדוח האמור.

יצוין כי על אף שנושא ייעול משק האנרגיה באמצעות כלי AI נידון בהקשרים שונים, בסקירה ראשונית של תוכניות לאומיות להטמעת בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה, מצאנו מספר מצומצם של דוגמאות, למעט הדוח המקיף יחסית של משרד האנרגיה של ארה"ב שנסקר בהרחבה במסמך. יצוין בהקשר זה כי הרגולטור הבריטי למשק האנרגיה פרסם באפריל 2024 קול קורא בבקשה לחוות דעת או הצעות בשאלה "כיצד ניתן להשתמש בבינה מלאכותית בסקטור האנרגיה באופן אחראי ובטוח כדי לעודד חדשנות".⁵ תוצאות התהליך טרם פורסמו נכון למועד כתיבת מסמך זה. כמו כן פרסם הרגולטור מעין מסמך הצהרת כוונות קצר ביחס לפעילות המתוכננת בתחום זה, לפיו המדיניות תתייחס לשימוש הצומח במהירות בבינה מלאכותית בסקטור האנרגיה; תתמוך בחדשנות בתחום ה-AI ככל שהיא נוגעת לאינטרס הצרכני ולהבטחת אספקה בת קיימא; תסייע בהתמודדות עם סיכוני AI; תפעל בתיאום עם מגזר האנרגיה ואל מול גופים בינלאומיים כדי לפתח כלים והנחיות בתחום. בנוסף, הרגולטור מציין כי יעסוק ב"סריקת אופק"; ב"יעוץ ו"קופסאות חול" (Sandboxing) ובניטור ואכיפה בתחומי ה-AI.⁶

באפריל 2024 פרסם משרד האנרגיה של ארצות הברית דוח המציג תחומים עיקריים בהם ניתן להטמיע כלי בינה מלאכותית בהם: תכנון רשת החשמל; היתרים וקביעת אתרים; תפעול ואמינות; ויכולת התאוששות מתקלות.

³ The White House, "[Executive Order on the Safe, Secure, and Trustworthy Development and Use of Artificial Intelligence](#)", October 30, 2023, accessed: October 24th 2024.

⁴ U.S Department of Energy, "[AI for Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy](#)", April 2024.

⁵ Ofgem, "[Use of AI within the energy sector call for input](#)", April 2024.

⁶ Ofgem, "[Ofgem's strategic approach to AI](#)", April 2024.

לוח 1. אפשרויות ליישום בינה מלאכותית לקידום רשת חשמל נקיה, דוח משרד האנרגיה של ארה"ב 2024⁷

תכנון	יישומים אפשריים
	השלמה, תיקון והאחדה של מידע אודות תשתית הרשת כדי לאפשר חיזוי של הצורך בהחלפת מתקני תשתית (Predictive asset replacement)
	הערכת פעילותן של מערכות דינמיות ברשת ⁸ לצורך ביצוע עדכונים, תחזוקה וזיהוי צורך עתידי במשאבים; הערכה בזמן אמת של קיבולת רשת החשמל
	מניעת אובדן אנרגיה במערכת באמצעות תחזוקה צופת פני עתיד
	איתור כשלים בפאנלים סולריים, בסכרים, להבי טורבינות רוח, גנרטורים ועוד
	עיבוד צילומי אוויר לבדיקת אתרים מרוחקים
	יידוע על אימוץ של טכנולוגיות רשת (כמו DLR ⁹ , או אופטימיזציות רשת אחרות); האצה של התורים לחיבור לרשת.
	לאפשר מידול של דפוסי השימוש במקורות אנרגיה מבוזרים כדי לצפות את הצורך בשדרוג מערכת החלוקה והשלכות על עומסים
היתרים וקביעת אתרים	ארגון, והאחדה של מידע ונתונים המבוזרים בין רגולטורים ברמה המקומית, הארצית והפדרלית כדי לשפר את יעילות ההליך האדמיניסטרטיבי.
	האצת הליכי הביקורת הסביבתית (כגון: אוטומציה של בדיקות וטפסים; עיבוד הערות ציבור)
	אופטימיזציה של תהליכי קביעת מיקום של מתקני אנרגיות מתחדשות ותשתיות הולכה, וייעול הליכי תכנון ורישוי.
	איסוף מידע על גודל ומיקום של פאנלים סולריים על גגות, אופטימיזציית מיקום של טורבינות רוח ועוד.
	זיהוי וניהול אתרים לאנרגיה גיא-תרמית באמצעות הדמיות לוויין ומידע ססמי.
	קביעת מיקומי סכרים הידרו-אלקטריים כדי לעמוד בדרישות אנרגטיות וסביבתיות.
תפעול ואמינות	שיפור החיזוי עבור אנרגיות מתחדשות (שמש, רוח, זרימת נהרות)
	שיפור החיזוי לביקוש לאנרגיה באמצעות אימון מודלים על מידע היסטורי על אקלים, מזג אוויר, מחירים ועומסי מערכת
	שיפור מערכות האופטימיזציה של רשת החשמל; הקטנת העומס המחשובי הנדרש למידול.
	תמחור זמן אמת כדי למקסם את היעילות התפעולית והכלכלית של מקורות אנרגיה מבוזרים, אגירה ועוד.
	חיזוי וצפיית אנומליות במערכת כדי למנוע הפרעות באספקה

⁷ שם, עמ' 16-17.

⁸ בניגוד למערכות סטטיות, מערכות דינמיות כמו גנרטור למשל הן מערכות שמשתנות לאורך זמן ומגיבות באופן רציף לשינויים בתנאים פנימיים וחיצוניים, תוך שאיפה לשמור על יציבות ויעילות.

⁹ Dynamic Line Rating היא מושג כולל לטכנולוגיות ומתודולוגיות שונות לניהול יעיל יותר של קווי תמסורת חשמל. בניגוד לשיטה המסורתית של דירוג סטטי (SLR), דירוג דינמי מאפשר לקבוע את קיבולת הזרם המרבית של קווי מתח גבוה בצורה דינמית, תוך התחשבות בתנאי הסביבה המשתנים בזמן אמת. להרחבה ראו: דוח של משרד האנרגיה האמריקאי בנושא מ-2019.

יישומים אפשריים	עמידות ויכולת התאוששות (Resilience)
ניטור פרואקטיבי שמטרתו שיפור עמידות התשתיות לאירועי מזג אוויר קיצוני	
ניטור, זיהוי וניתוח של אירועי אנומליה (בהם: מזג אוויר קיצוני ומתקפות סייבר)	
שיפור התיאום בין מערכות תלויות (גז טבעי, מים ועוד) ¹⁰ כדי לחדש פעילות לאחר הפרעה.	
חיזוק המודעות המצבית (ניטור, ניתוח והבנת מצב) בין מערכות באמצעות "תאומים דיגיטליים" ¹¹ וחיבור של כלי AI עם מערכות נוספות (Coupled AI)	
שיפור הדיוק ויכולת הפרשנות של חיזוי מפולות, עליית פני הים, גלי סערה ועוד	
הדמיה של הפרעות ותרחישי אסון כדי לבסס אסטרטגיות התאוששות	
חיזוק היעילות והתיאום במערכת במצבי אתחול הרשת בשל הפסקת חשמל מלאה או חלקית.	
ייעול השמה של צוותי תיקון ותחזוקה כדי לקצר את זמן התגובה	
זיהוי הנתיב המהיר ביותר לשחזור פעילות המערכת	

כפי שניתן לראות בטבלה לעיל, ישנן אפשרויות רבות להטמיע טכנולוגיות או כלי AI כדי לייעל שלבים שונים בשרשרת האספקה של רשת החשמל. יצוין כי למרות שהדוח מגדיר את כיווני הפעולה הללו כברי מימוש באופן מיידי, נראה כי לא בכל התחומים האמורים יש מוצרי מדף הניתנים להטמעה ומשתמע כי חלק ניכר מן הכיוונים האמורים דורשים פיתוח או התאמה כדי ליישם. בנוסף לכך, כפי שמצוין גם בדוח, ישנן דרישות ואתגרים שונים להטמעתם של כלי AI בכלל ובסקטור האנרגיה בפרט.

להלן נציג בקצרה בטבלה עקרונות נדרשים כדי להטמיע יישומי AI בסקטור האנרגיה בצורה זהירה לפי דוח משרד האנרגיה של ארה"ב.

לוח 2. עקרונות להטמעה של כלי AI בסקטור האנרגיה, מדוח משרד האנרגיה של ארה"ב,

¹²2024

איומות קפדני של מערכות	ביסוס פיזיקלי והסברות
יש לוודא כי המודלים, המידע והנתונים ששימשו לאימון אומתו ודויקו באמצעות סביבות הדמיה המדמות תרחישי עולם אמיתי. תהליכי האימות והתיקוף חיוניים לוודא את האמינות והבטיחות של היישום של AI בתפעול רשת החשמל	הפלט של מערכות ה-AI חייב להיות קונסיסטנטי עם חוקי הפיזיקה הבסיסיים כדי לספק פתרונות ריאליסטיים, ניתנים להסבר וברי מימוש. מודלים תקפים פיזיקליים שמדמים במדויק את זרימת החשמל ברשת יכולים להוביל לאספקה יעילה ואמינה של חשמל.

¹⁰ הכוונה למערכות שיש זיקות ביניהן לצורך פעולתן למשל: מים נדרשים לקירור תחנות כוח ולהפקת גז טבעי, ומערכת אספקת הגז הטבעי זקוקה לחשמל להפעלת תחנות דחיסה ולניהול ההובלה.

¹¹ ראו הערת שוליים מס' 2.

¹² U.S Department of Energy, "[AI for Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy](#)", April 2024, Pp: 8-9.

פיקוח אנושי צריך להיות חלק אינטגרלי בתהליכים מונעי AI כדי לוודא שהתוצאה תהיה אתית, פרקטית, בטיחותית, בטוחה וחדשנית. גישות של מעורבות אנושית משלבות מיומנות אנושית ואחריותיות בתהליכי קבלת החלטות ומאפשרות למפעילים לבחון המלצות מבוססות AI ולשפר אותן.	מעורבות אנושית (Human In the Loop)
בהתחשב בהתרחבות השימוש בהתקני קצה – Edge Devices (התקנים מחוברים הפועלים בקצה הגריד קרוב לנקודת הצריכה של הלקוח כמו חיישנים, מונים חכמים וכדומה) והגידול בביקוש לחשמל, מערכות AI נדרשות לעבד ולנתח כמויות גדולות של מידע ונתונים בזמן אמת או קרוב לזמן אמת כדי ליידע על החלטות תפעוליות.	ביצועים ויכולת התאמה להיקפים גדולים (Scalability)
רשת החשמל היא תשתית קריטית, ולפיכך מערכות AI ברשת זו נדרשות לעמוד בדרישות וסטנדרטי בטיחות סייבר מחמירים. מערכות AI גם צריכות לקחת בחשבון את העקרונות של עיצוב מתואם אתית (Ethically Aligned Design).	אתיקה ומשילות

כפי שניתן לראות לעיל, הדוח מציג מספר עקרונות חיוניים להטמעה של מערכות בינה מלאכותית בסקטור החשמל. נראה כי לאור מאפייניה של טכנולוגיית הבינה המלאכותית שמאפשרת יותר ויותר פעולות ללא מעורבות אנושית, כדאי לשים לב לתפיסה בדוח לפיה חשוב לשמר בני אדם בתהליכי הטמעה ושימוש בבינה מלאכותית. עקרון זה מתחבר לעקרון ההסברתיות (Explainability). עקרון ההסברתיות מאתגר את הטמעתם של כלי AI לעיתים, בשל מאפייני ה"קופסא השחורה" של החלטות מכונה - כאשר הקשר בין הקלט (המידע המוזן) והפלט (התוצאה) אינם בהכרח ניתנים להסבר ומבקש ממפתחי מערכות בינה מלאכותית ליצור מנגנוני הסבר והנמקה להחלטות מכונה.¹³ העקרונות בדוח משרד האנרגיה אינם ממצים, והדוח גם מתייחס לסוגיות ספציפיות נוספות כגון התמודדות עם החשש להטיה או אפליה אלגוריתמית, וסוגיית הפרטיות.

יצוין כי המשרד למדיניות, מדע וטכנולוגיה של הבית הלבן פרסם תוכנית עקרונית בדבר זכויות בתחום הבינה המלאכותית. התכנית מדגישה חמישה עקרונות: (1) מערכות בטוחות ויעילות; (2) הגנות מפני אפליה אלגוריתמית; (3) פרטיות מידע; (4) הודעה והסבר; (5) שיקול חלופות אנושיות ופתרונות חלופיים.¹⁴

1.2 אתגרים בהטמעה ושימוש בבינה מלאכותית בתחום האנרגיה

1.2.1 התמודדות עם החשש להטיות ואפליה¹⁵

אחד האתגרים של שימוש נרחב בכלי בינה מלאכותית הוא הפוטנציאל של פיתוח או יישום של מערכות כאלה באופן שעלול לפגוע בזכויות, בשוויון ובצדק סביבתי. ישנן בעיות מתועדות של

בשימוש נרחב בכלי
בינה מלאכותית יש
לוודא כי הפיתוח
והיישום של מערכות
כאלה יעשה באופן
שלא יפגע בזכויות,
בשוויון ובצדק
סביבתי.

¹³ להרחבה ביחס לסוגיית ההסברתיות בהטמעת בינה מלאכותית בתחום האנרגיה ראו:

R. Machlev et al., "Explainable Artificial Intelligence (XAI) Techniques for Energy and Power Systems: Review, Challenges and Opportunities", **Energy and AI**, (9) 2022.

¹⁴ The White House, Office of Science and Technology Policy, "[Blueprint for an AI Bill of Rights](#)", accessed: October 24th 2024.

¹⁵ U.S Department of Energy, "[AI for Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy](#)", April 2024.

אפליה או הטיה של מערכות AI בתחומים שונים, בהן: כלי שיטור צופה פני עתיד המבוססים על נתונים מתקופות בהן היו נהוגות פרקטיקות שיטור מוטות גזעית; ציוני סיכון לעבריינות חוזרת המבוססים על פערים גזעיים קיימים; כלי סינון אוטומטיים ל"שוכרים בסיכון גבוה יותר" או אלגוריתמים לקבלת החלטות בדבר הלוואות לדיור שהשפיעו באופן לא פרופורציונלי על קבוצות מיעוט ועוד.¹⁶

החששות לגבי הטיה ואפליה חלים גם בסקטור האנרגיה. לדוגמה, **אלגוריתמים או מערכות בינה מלאכותית לזיהוי נתיבים או אתרים לתשתיות שמטרתם לזהות אתר "בעלות הנמוכה ביותר" עלולים לזהות אזורים בעלי ערך נכס נמוך או שיעורי עוני גדולים יותר למיקום תשתיות, דבר שעלול להנציח השפעות מתמשכות של אפליה בדיור, תכנון מדי, או החלטות או דפוסי שימוש בקרקע מפלים אחרים (אי-צדק סביבתי).** הטיית אלה עשויות להתקיים גם כאשר מפתחי מודל הבינה המלאכותית מנסים למנוע הטיה ואפליה (למשל באמצעות הסתרת משתנים כמו גזע או מגדר).

כדי להתמודד עם בעיות אלה, הצו נשיאותי בנושא "פיתוח ושימוש בטוח, מאובטח ואמין בבינה מלאכותית" מתווה הנחיות לסוכנויות ומפרט מספר פעולות שעל הסוכנויות לנקוט כדי להימנע מאפליה בבינה מלאכותית ולהגן על זכויות אזרח, בהן: בחינת הסמכויות שיש לסוכנויות למנוע הטיה אלגוריתמית; פרסום תוכניות והנחיות לרשויות למנוע הטיה בכל מערכת אוטומטית המשמשת לחלוקת הטבות, והוצאת הנחיות לגבי השימוש בכלי בינה מלאכותית בהחלטות דיור. שיטות עבודה מומלצות שפותחו בהקשרים אלה יכולות לסייע בהכוונת פיתוח נאות של מערכות בינה מלאכותית לאנרגיה.

1.2.2 סיכוני אבטחה ביישום כלי AI

דוח משרד האנרגיה¹⁷ מסמן ארבע קטגוריות של סיכוני אבטחה ביישום כלי AI בתחום האנרגיה:

- **כשלים לא מכוונים:** במקרים של יישומים מסחריים של כלי AI יכולים להתרחש כשלים שונים בהם: הטיה ואפליה (כפי שהוצג לעיל); כשל באקסטרפולציה - בניסיון להשליך או לחזות על בסיס מודל ביחס לאירועים לא צפויים שהמודל לא אומן עליהם ויכול להתנהג באופן לא צפוי; כשל בהתאמה (misalignment) – כאשר המודל מתנהג באופן שאינו הולם את הכוונות והמטרות של מעצביו (למשל בשל מידע אימון לקוי או הגדרת מטרות לא מוצלחת).
- **התקפה של יריבים כנגד מערכת AI:** למערכות למידת מכונה יכולות להיות פגיעויות מעבר לפגיעויות הסייבר המוכרות, ולעיתים קרובות הפגיעויות והמתקפות יתבססו על

למערכות למידת מכונה יכולות להיות פגיעויות מעבר לפגיעויות הסייבר המוכרות. הפגיעויות והמתקפות יתבססו לעיתים קרובות על העובדה כי מערכות AI הן מונעות מידע ונתונים.

¹⁶ לדוגמאות נוספות ראו: רועי גולדשמידט, "אפליה אלגוריתמית במערכות המבוססות על בינה מלאכותית", מרכז המחקר והמידע של הכנסת, יוני 2020.

¹⁷ U.S Department of Energy, "AI for Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy", April 2024, Pp: 24-25.

העובדה כי מערכות AI הן מונעות מידע ונתונים. מתקפות נפוצות הן: הרעלה – הוספה, שינוי או שיבוש מידע ונתונים שמשמשים לאימון המודל כדי לגרום לו ללמוד להתנהג בשונה מכוונת מתכנניו; התחמקות – יצירת מידע ונתונים לקלט המחשב (למשל שאילתה או תמונה) שנראים לאדם רגילים, אך גורמים למודל לספק פלט התואם את כוונת התוקף; חילוץ מידע – התקפה שמטרתה לגרום לדלף מידע ממערכת בינה מלאכותית;

- **שימוש עוין בכלי AI:** כלי בינה מלאכותית יכולים לשמש לעיצוב מתקפות סייבר או תקיפות פיזיות של תשתיות אנרגיה ולהפוך אותן ליעילות יותר עבור התוקף. בין השאר הן יכולות לשמש באופנים אלה: חיפוש חולשות ופגיעויות בקבצי טקסט גדולים; שימוש לרעה במודלים כדי לבחון את מידע האימון או את המודל עצמו; עיצוב מתקפות תוך שימוש במודל בינה מלאכותית; התחמקות מכלים לזיהוי מתקפות סייבר ועוד.
- **פגיעה בשרשרת האספקה של תוכנות AI:** בדומה לפגיעויות מסורתיות של תוכנות אחרות, גם תוכנות בינה מלאכותית חשופות למתקפות סייבר דוגמת שיבוש של קוד או רכיב תוכנה אחר במטרה להשתמש בו כווקטור תקיפה עתידי. בפרט, השימוש ברכיבי קוד פתוח או כלים מבוססי בינה מלאכותית יוצרת יכול להוות פתח למתקפת סייבר. משרד האנרגיה של ארה"ב גם פרסם בשנת 2022 דוח איומי סייבר לשרשראות אספקה של רכיבים דיגיטליים במערכות בסקטור האנרגיה.

דוגמאות למתקפות על רשתות חשמל

בסקירת ספרות מקיפה העוסקת במתקפות על רשתות חשמל חכמות (Smart Grid) מוצגות טכניקות תקיפה והגנה שונות על שכבות שונות ברשת החשמל תוך שימוש בלמידה עמוקה (Deep Learning) שהיא טכניקה מתחום הבינה המלאכותית.¹⁸ המאמר ממפה שורה של איומים בהם:

- **מתקפות גניבת חשמל –** באמצעות שיבוש הקריאה של מונים יכולים תוקפים להקטין את גובה חשבון החשמל ולגנוב חשמל. לפי המאמר, מתקפות מסוג זה גורמות להפסדים של 100 מיליארד דולר בשנה ברחבי העולם. יתרה מכך, שיבוש הקריאה של מונים יכולה לגרום להתחממות של שנאים בשל הגדלת הצריכה בהעדר אספקת חשמל

איומי אבטחה על
רשתות חשמל יכולים
לכלול: מתקפות
שמטרתן גניבת
חשמל, התקפת
הזרקת נתונים כוזבים
על אומדן מערכת
החשמל, התקפת
פקודה כוזבת
שמטרתה לשבש את
פעילות מערכת
החשמל, ועוד.

¹⁸ Jiaqi Ruan et al., "[Deep Learning for Cybersecurity in Smart grids: Review and Perspectives](#)", **Energy Conversion and Economics**, 2023; 4: 233–251.

למידה עמוקה היא סוג של למידת מכונה שעיצובה מתבסס על המבנה והפונקציות של המוח האנושי ועל האופן שבו המוח מעביר מידע. ללמידה עמוקה מתבססת על רשתות נוירונים מלאכותיות מרובות שכבות (ומכאן "עמוקה"), שאלהן מוזן מידע ובהן הוא מעובד, מיוצג במספרים ומפוענח לכדי פלט. ככל שהרשת עמוקה ורחבה יותר וכוללת יותר קשרים, היא יכולה לעבד מידע מורכב יותר ולפתור בעיות מורכבות יותר. ראו: רועי גולדשמידט, "[נשגב מבינתי? מושגי יסוד בבינה מלאכותית](#)", מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 19 באוקטובר 2023.

מתאימה ואף להפסקות חשמל. גרסה אחרת של מתקפה כאמור מפזרת את עלויות החשמל הנוספות בין צרכנים אחרים בקהילה וכך מסווה את המתקפה.

- **התקפת הזרקת נתונים כוזבים על אומדן מערכת החשמל** – התקפות כאלה יכולות לעשות שימוש בלמידה עמוקה כדי לאתר פגיעויות במערכת וליצור למשל מצג שווא של ביקוש נמוך שיוביל להחלטה על הקטנת היקפי הייצור – כביכול בהתאמה, אך בפועל יגרום לפער ניכר בין הייצור והצריכה ובשל כך להפסקות חשמל נרחבות. שיטות למידה עמוקה משמשות בהקשר זה הן כדי ליצור מתקפות כאלה והן כדי להגן מפניהן.
- **התקפת פקודה כוזבת (False Command Attack)** – היא שיטה נוספת בה למשל תוקפים את יחידת ניהול המערכת (PMU) ומשבשים את המידע בה ובכך גורמים להחלטות מוטעות מצד המפעיל או ששולחים פקודות מוטעות למערכת (למשל לנתק קו חשמל בשל תקלה כביכול) וכך פוגעים בתפקודה.

המאמר מצביע הן על שימוש בטכניקות מתחומי הבינה המלאכותית כאמצעי למתקפות סייבר והן כאמצעי לפיתוח הגנות מפני מתקפות כאלה. לפי המאמר **הדיגיטציה של רשת החשמל והתפתחותן של רשתות חכמות חושפת אותן מחד לפגיעויות מוגברות ומאידך מאפשרת ליישם טכניקות למידה עמוקה כדי לייעל את ההגנה על הרשת.**

1.2.3 גישה למידע ונתונים

הטמעת בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה תלויה רבות בזמינות ובאיכות המידע והנתונים. חברות בתחום האנרגיה מחזיקות בכמויות גדולות של נתוני זמן אמת ונתונים היסטוריים בהם: מידע על תפעול מתקנים, ביצועי ציוד, צריכת אנרגיה ותחזיות שוק. הגישה לנתונים והיכולת לעבד אותם הכרחיים ליישום מוצלח של טכנולוגיות בינה מלאכותית, עבור אופטימיזציה של תהליכים, חיזוי תחזוקה, וניהול יעיל יותר של רשתות החשמל.

עם זאת, גישה לנתונים היא תנאי הכרחי אך לא מספיק שכן האתגר בהטמעת בינה מלאכותית בסקטור האנרגיה תלוי לא רק בגישה לנתונים, אלא גם באיכותם ובארגונם. התמודדות עם בעיות של נתונים מבוזרים, לא מאורגנים או לא מתווגנים כראוי, חיונית כדי לאפשר את השימוש בהם ביעילות. בשל האמור השקעה בתשתיות נתונים, כולל מערכות איסוף, טיוב וארגון נתונים, חשובה להצלחת יישומי בינה מלאכותית בתחום. בנוסף, יש צורך בפיתוח מומחיות בניתוח נתונים ובהבנת הקשר בין הנתונים לבין תהליכים עסקיים ותפעוליים בתעשיית האנרגיה.¹⁹

בקונטקסט הישראלי ומבנה שוק החשמל בישראל, חלק ניכר מן המידע והנתונים מצוי בידי חברת החשמל וחברת נגה. לגישה של חוקרים או מפתחים למידע יכולה להיות תרומה לפיתוח

הגישה לנתונים והיכולת לעבד אותם הכרחיים ליישום מוצלח של טכנולוגיות בינה מלאכותית, עבור אופטימיזציה של תהליכים, חיזוי תחזוקה וניהול יעיל של רשתות חשמל. חסמים למתן גישה לנתונים כוללים סוגיות של הגנה על פרטיות ושמירה על הביטחון הלאומי

¹⁹ McKinsey & Company, "[Beyond the Hype: New Opportunities for Gen AI in Energy and Materials](#)", February 5th, 2024, accessed: October 31st 2024.

השוק ולפיתוח יישומים ספציפיים. לפי אמיר ליבנה, סמנכ"ל האסטרטגיה והחדשנות בחברת החשמל, סוגיית הגישה לנתונים (DATA) מצד חוקרים או חברות סטארט-אפ היא נושא מורכב הן בגלל סוגיות של הגנת פרטיות והצורך בהתממה (אנונימיזציה) של נתונים והן בשל סוגיות הנוגעות לביטחון לאומי. שכן גם מידע טריוויאלי כביכול יכול להיפך לרגיש ולשמש לרעה לצורך מתקפות סייבר או זיהוי פגיעויות אחרות. לכן לדבריו למרות שמדינות אחרות משתפות באופן חופשי יותר נתונים אודות רשת החשמל, בישראל נדרשת זהירות רבה יותר.²⁰

בהקשר זה יצוין שהיקף הנתונים בנוגע לצריכת החשמל וזמינותם לגורמים שונים עשוי לגדול משמעותית בשנים הקרובות עם פריסתם של מונים חכמים. **לפי נתוני רשות החשמל, נכון למרץ 2024 הותקנו כ-800,000 מונים חכמים.²¹ ולפי החלטת רשות החשמל ספקי שירות חיוניים ישלימו את החלפת המונים לכלל הצרכנים במשך עד לסוף שנת 2028 (למעט מחוז ירושלים בו חברת החשמל נדרשת להחליף את המונים עד לסוף שנת 2030.²² יצוין כי ברשות החשמל קבעו עקרונות לניהול מידע במשק החשמל, ובהם נקבע בין היתר כי נדרשת הפרדה ברורה בין מחזיק המידע על המונים החכמים לבין המידע עצמו, כיוון שהצרכנים הם הבעלים של מידע זה.** עם זאת, חברת נגה נדרשת לפרסם את כלל המידע במשק לתועלת הציבור, לאחר ניתוח סטטיסטי של הצריכה וניתוח המידע בכלים סטטיסטיים מתקדמים.²³

2. הטמעת כלי בינה מלאכותית במשק החשמל בישראל

בישראל כמה גופים מרכזיים שלהם נגיעה לחלקים שונים במשק החשמל: ניהול המערכת - חברת נגה; חברת החשמל-ייצור והולכה; רשות החשמל ומשרד האנרגיה- האמונים על היבטים שונים של רגולציה. כפי שניתן לראות בפרק שלעיל, ניתן ליישם כלי AI בהיבטים שונים של משק החשמל- בתכנון, בייצור ובתפעול ובניהול המערכת.

להלן תוצג התייחסות תמציתית של כמה גופים מרכזיים לשאלת ההטמעה של כלי AI במשק החשמל. מפאת קוצר היריעה לא סקרנו חברות הזנק הפועלות בתחום האנרגיה והבינה המלאכותית.

2.1 משרד האנרגיה והתשתיות

ביוני 2023 פרסם המדען הראשי במשרד האנרגיה כי שר האנרגיה הקים "ועדה שתמפה את התחומים בהם ניתן לשלב AI לצורך שיפור ביצועים במשק האנרגיה ותציע דרכים לסייע במחקר

²⁰ אמיר ליבנה, סמנכ"ל אסטרטגיה וחדשנות, חברת החשמל, שיחת טלפון 14 באוקטובר 2024.

²¹ איתי גוטגליק, רשות החשמל, שיחת טלפון, 5 במאי 2024.

²² רשות החשמל, [החלטה מס' 65701: הרחבת תכנית הפריסה של מונים חכמים](#), יוני 2023.

²³ רשות החשמל, [החלטה מס' 61610: עקרונות לניהול מידע במשק החשמל](#), אוקטובר 2021.

להרחבה בנושא מונים חכמים, חשיבותם לתחרות במשק החשמל וחובות ההפרדה של המידע ראו: נעם בוטוש, "[תיאור וניתוח של יישום הרפורמה במשק החשמל – מאי 2024](#)", 20 במאי 2024, מרכז המחקר והמידע של הכנסת.

ביוני 2023 פרסם
המדען הראשי כי שר
האנרגיה הקים ועדה
שתמפה את
התחומים בהם ניתן
לשלב AI לצורך
שיפור ביצועים במשק
האנרגיה ותציע
דרכים לסייע במחקר.
המדען הראשי
התפטר והועדה לא
פעלה עד כה.

כדי לקדם במהירות פתרונות בתחומים החשובים למשק האנרגיה". לפי הפרסום, הוועדה תעסוק בנושאים: מיפוי התחומים בהם יש יתרון ופוטנציאל שילוב של בינה מלאכותית לשיפור ביצועים; איך AI יכול לתרום לפעילות המו"פ; מה הן התשתיות הנדרשות לשילוב AI; ומה פוטנציאל התרומה של שימוש במערכות AI. בפרסום מבקש כותבו חוות דעת והמלצות למומחים בתחום.²⁴ עם זאת, בהמשך שנת 2023 פרש מתפקידו המדען הראשי במשרד ועד כה טרם מונה לו מחליף.

מבירור עם סמנכ"לית תכנון מדיניות ואסטרטגיה במשרד האנרגיה עלה כי המשרד החל לבחון את נושא השימוש בבינה מלאכותית השפעותיו והשלכותיו על תחום האנרגיה, עם זאת, **הוועדה שבראשה אמור היה לעמוד המדען הראשי במשרד, לא פועלת כרגע.**²⁵

2.2 רשות החשמל

לפי רשות החשמל, למרות שהנושא איננו בליבת העיסוק שלהם, ליישומי AI בתחום האנרגיה יש פוטנציאל לייעל ולשפר את תפקודן של מערכות שונות ברשת החשמל. כך למשל חיזוי היקפי הצריכה והפעלת מתקני הייצור יכולה להשתפר כאשר קיימת יכולת מתקדמת לניתוח הנתונים ומתן תגובה מהירה לתרחישים כמו אירועי מזג אוויר או תקלות. במיוחד במשק של עשרות אלפי מתקני ייצור בגדלים שונים, באופן מבוזר, ובטכנולוגיות שונות, כלי בינה מלאכותית יכולים לשפר את החיזוי ואת התגובתיות של המערכת למצבים שונים, באופן שמורכב יותר לגורם אנושי הנעדר כלים כאלה.²⁶

2.3 חברת נגה – ניהול מערכת החשמל

לפי נגה, השימוש ב-AI מייצר אתגרים שונים לחברה המנהלת תשתית מדינה קריטית כמו תשתית החשמל ובהם סוגיות כמו הגנת הפרטיות, אבטחת מידע, גישה למידע ועוד, ולפיכך החברה פועלת על מנת לאזן בין צרכי משק החשמל בהיבט של תחרותיות וסחר לבין ההכרח למזער את הסיכונים השונים למשק החשמל, בהם סיכונים סייבר וסיכונים דומים להם. כך, מערכות קריטיות של החברה אינן מחוברות לענן או לאינטרנט, ולכן שימוש עתידי בטכנולוגיות AI במערכות אלו יהיה חייב להיות בהכרח כזה שעובד באופן מקומי ללא חיבורים חיצוניים וללא תלות במאגרים ואלגוריתמים חיצוניים. בנוסף, החברה פועלת על מנת להבטיח הגנה על מידע רגיש אותו היא מנהלת, ועל מנת לבחון את אמצעי ההגנה ואת פתרונות האבטחה שהיא נוקטת ולשפר אותם. בתוך כך מדגישים בנגה כי חשוב להגביל את העברתו של מידע ארגוני רגיש לספקי שירותי ה-AI אשר מבקשים להעשיר ולהגדיל את מאגרי המידע ולשפר את האלגוריתמים,

לפי חברת נגה, חשוב להגביל את העברתו של מידע ארגוני רגיש לספקי שירותי AI, שכן איסוף המידע על ידי ספקים אלו יחשוף את המידע לכל דורש ובכללו גורמים זדוניים. החברה עושה שימוש בכלי AI בתחומים פחות רגישים של פעילותה

²⁴ גדעון פרידמן, המדען הראשי במשרד האנרגיה והתשתיות, "[פרסום פניה לקבלת מידע בנושא האינטליגנציה המלאכותית](#)", 13 ביוני 2023.

²⁵ שרון חצור, סמנכ"לית תכנון, מדיניות ואסטרטגיה, משרד האנרגיה והתשתיות, שיחת טלפון, 25 לספטמבר 2024.

²⁶ רותם אליהו, מנהלת אגף בכיר תכנון מדיניות ואסטרטגיה, רשות החשמל, דוא"ל מענה לפניית מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 30 באוקטובר 2024.

שכן איסוף המידע על ידי ספקים אלו יחשוף את המידע לכל דורש ובכלל גורמים זדוניים. בהינתן המגבלות האמורות, **החברה עושה שימוש, בתחומים רגילים פחות של פעילותה, בתוכנות מדף קיימות, במודלים שונים מבוססי Open Source-I Machine Learning לצורך טיוב פעילויות שבתחום אחריותה לרבות שיפור אמצעי החיזוי למזג האוויר ומאפיינים מטאורולוגיים אחרים ולביקושים לחשמל. החברה חותרת להרחיב את פעילותה באמצעות מודלים אלו, כאמור תחת המגבלות לעיל, הן לצרכים פנים אירגוניים, והן לצרכים תפעוליים ובחינת כלים שיאפשרו את שיפור הניתוח של מקורות המידע** (בין השאר בתחום הפוטו וולטאי-PV, בהיבטי תכנון שונים, ובתחום ניהול הפרויקטים, שירות לקוחות ואופטימיזציה של הסחר בחשמל).²⁷

2.4 חברת החשמל

לפי אמיר ליבנה, סמנכ"ל האסטרטגיה והחדשנות בחברת החשמל, החברה עוסקת בנושא הבינה המלאכותית באופן אינטנסיבי מזה כ-5 שנים עוד טרם מהפכת הבינה המלאכותית היוצרת.²⁸ ליבנה מחלק את העיסוק בבינה מלאכותית והטמעתה לסגמנטים שונים של פעילות:

- **שירות לקוחות, ושימוש בכלי AI בתוך הארגון לניהול ויעול תהליכים** (דוגמת רכש, ניהול מלאים, בעתיד ניהול ספרים) – בהיבט זה משק האנרגיה אינו שונה מתחומי עיסוק אחרים, וכלי בינה מלאכותית המבוססים על מודלי שפה גדולים יכולים לספק כלים ופתרונות אפקטיביים. חברת החשמל מבצעת פיילוטס ועוסקת בפיתוח כלים לפעילותה. בנוסף, חח"י הקימה יחידה ייעודית בחטיבת המחשוב ל-AI ואנליטיקה. עם זאת לדבריו חסם השפה בעברית משמעותי במודלי שפה גדולים (LLM) וחברת החשמל שותפה עם גופים נוספים ביוזמות להתמודדות עם הנושא של אימון מודל בעברית.
- **דיפ-טק של טכנולוגיות אנרגיה עתידיות:** כחלק מהפיתוח של טכנולוגיות עתידיות כגון היתוך גרעיני והמורכבות החישובית הנלווית לתהליכי סימולציה יהיה לדברי ליבנה הכרח לעשות שימוש ביכולות AI. בשל מורכבות התהליכים יהיה הכרח לשלב כלי AI הן בהדמיה והן בתפעול של טכנולוגיות אנרגיה עתידיות. חח"י איננה עוסקת בפיתוח ישיר בתחומים אלה, אך לדבריו היא משקיעה בחברות הפועלות בתחומים אלה.
- **תפעול של ייצור חשמל – תהליכי התפעול, הייצור והסימולציות הנדרשות הופכים מורכבים יותר והיקפי הנתונים והעיבוד הנדרש גדלים ומכאן כי השילוב של כלי AI הופך חיוני יותר.** חח"י הקימה מרכז מתקדם לניטור של תחזוקה חזויה ואופטימיזציה של תהליכים.

חברת חשמל
משתמשת בכלי בינה
מלאכותית
בפעילותה, אם באופן
ישיר (הקמת מרכז
לניטור של תחזוקה
חזויה ואופטימיזציה
של תהליכים, פיתוח
תאום דיגיטלי של
רשת החשמל, ועוד),
ואם באופן עקיף
באמצעות שיתופי
פעולה

²⁷ עו"ד נעם ברימן, היועץ המשפטי ומזכיר החברה, נגה- ניהול מערכת החשמל, דוא"ל מענה לפניית מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 5 בנובמבר 2024.

²⁸ אמיר ליבנה, סמנכ"ל אסטרטגיה וחדשנות, חברת החשמל, שיחת טלפון 14 באוקטובר 2024.

• **תכנון ופיתוח רשת החשמל** – היקפי זרימת המידע, הרב כיווניות שלה והתפתחותה של רשת החשמל שכוללת יותר שחקנים ודורשת יכולות חישוב מתקדמות הן לצורך קבלת החלטות בזמן אמת והן לצרכי תכנון עתידי מחייבים את הכנסתם של כלי AI. חח"י מבצעת פיילוטים של ניטור רשת החשמל, חלקן עם חברות ישראליות, ובנוסף מפתחת תאום דיגיטלי של רשת החשמל כדי לאפשר סימולציה תכנונית ותפעולית של הרשת.

• **סחר בחשמל** – לפי ליבנה שוק חשמל משוכלל, מרובה שחקנים ודינמי ידרוש שילוב של כלי AI. עם זאת לדבריו שוק החשמל בישראל כיום הוא עדיין קטן ולא פועל בהיקף מלא. במקביל לגידול במספר השחקנים בשוק, סביר כי השימוש בכלי AI ייהפך למשמעותי יותר לצרכי הסחר בחשמל.

כפי שתואר לעיל, יש פוטנציאל רב בהטמעתם של כלי בינה מלאכותית במשק האנרגיה על שלביו השונים (ייצור, ניהול המערכת ועוד). בפרקים הבאים יידון היבט נוסף של השפעת הבינה המלאכותית על משק האנרגיה והם יתמקדו בצד הביקוש, כלומר בצריכת החשמל של תשתיות הבינה המלאכותית, ובפרט של חוות השרתים. פרק 3 יבחן את הסוגיה ואת ההתמודדות איתה במדינות שונות בעולם, ופרק 4 יתייחס לתחזיות צריכת החשמל על ידי חוות שרתים בישראל.

3. צריכת החשמל של תשתיות בינה מלאכותית

אחד ההיבטים של עליית היקף השימוש בכלי בינה מלאכותית יוצרת הוא הצורך בתשתיות מחשוב רבות יותר, ובעלייה בצריכת האנרגיה הנדרשת להפעלתן. בהשוואה בין שאילתה במנוע החיפוש של Google לבין שאילתה דומה באמצעות ChatGPT, השאילתה באמצעות כלי הבינה המלאכותית תדרוש כוח מחשוב רב יותר, שיתורגם לצריכת חשמל גבוהה כמעט פי עשרה.²⁹ לפי פרסום מיוני 2024, שימוש בבינה מלאכותית ליצירת תמונה, למשל, דורש פי אלף יותר חשמל משאילתה כתובה של בינה מלאכותית.³⁰

3.1 צריכת החשמל של חוות שרתים

צרכי האנרגיה של כלי בינה מלאכותית באים לידי ביטוי בחשמל הנדרש להפעלתן של חווות שרתים (Data Centers):³¹ כלי בינה מלאכותית כגון ChatGPT דורשים בדרך כלל גישה ל"ענן", כאשר שאילתות נשלחות דרך האינטרנט למחשבים בחוות שרתים ייעודיות, בהן נעשה שימוש

כלי בינה מלאכותית יוצרת צורכים יותר חשמל משירותים מקוונים אחרים – שאילתה באמצעות כלי AI דורשת פי עשרה יותר חשמל מחיפוש ב-Google, ויצירת תמונה או וידאו דורשים עשרות מונים יותר

צריכת החשמל של חוות שרתים, המשמשות בין היתר לפעילותם של כלי הבינה המלאכותית, היוותה כ-2% מכלל צריכת החשמל בעולם בשנת 2022

²⁹International Energy Agency, [Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026](#), January 2024, p. 34.

³⁰ Alexandra Sasha Luccioni, Yacine Jernite, Emma Strubell, [Power Hungry Processing: Watts Driving the Cost of AI Deployment?](#), FAccT '24: Proceedings of the 2024 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency, June 5th 2024, pp. 85-99.

³¹ בנוסף לצרכי החשמל שנדרש להפעלת חוות השרתים, בדרך כלל נעשה שימוש במים רבים כחלק ממנגנוני הקירור שלהן. מסמך זה לא עוסק בצריכת המים ובכלים לחסכון בשימוש במים, או בהשפעה הסביבתית של הצורך המדובר במים. למידע נוסף ראו למשל:

Pengfei Li et al, [Making AI Less "Thirsty": Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models](#), arXiv:2304.03271, April 2023.

במעבדים גרפיים (GPUs), שהם מעבדים המתאימים במיוחד לצרכים של תוכנות בינה מלאכותית. בכל חוות שרתים יש מאות ואף אלפי מחשבים, בנוסף למערכות נוספות הצורכות חשמל, ובפרט מערכות לקירור המחשבים. חוות שרתים כוללות מערכות שונות להבטחת רציפות תפקודית, הן בהיבטים של גיבוי מידע והן בנוגע לאמינות אספקת חשמל, כמו גנרטורים, או מערכות אל-פסק.³² צריכת החשמל של חוות שרתים גבוהה פי עשרה עד פי חמישים מצריכת החשמל של חלל משרדי בשטח זהה.³³ לפי דוח של סוכנות האנרגיה הבין לאומית (IEA), נכון לינואר 2024 היו בעולם מעל 8,000 חוות שרתים כאלו, במדינות שונות, ונכון לשנת 2022, חוות אלה צרכו כ-460 טרה-וואט שעה (TWh), שהם כ-2% מסך צריכת החשמל בעולם. לפי תחזית ה-IEA, הצריכה צפויה לגדול עד שנת 2026 בשיעור שבין 35% (לסך של 620 TWh) ו-128%³⁴. (1,050 TWh)

חלקם של יישומי בינה מלאכותית בצריכת החשמל של חוות שרתים עמד על כ-10%-20% בשנת 2024, שיעור שצפוי לגדול משמעותית בשנים הבאות

חלקה היחסי של בינה מלאכותית בצריכת החשמל של חוות שרתים: יש להדגיש כי אותם מחשבים שבחוות משמשים לצרכים נוספים מעבר לבינה מלאכותית, כגון שירותי ענן (אחסון מידע, הזרמת מדיה (streaming), משחקי מחשב ועוד) או לכריית מטבעות קריפטו.³⁵ מתוך שירותים אלה, חלקן של מערכות בינה מלאכותית נכון ל-2023 הוא קטן יחסית, אך לפי תחזית ה-IEA, צרכי האנרגיה של תעשיית הבינה המלאכותית צפויים לגדול פי 10 בין שנת 2023 ושנת 2026.³⁶ כמו כן, גופים שונים מזהים את הבינה המלאכותית כשחקן משמעותי בגידול הצפוי בצריכת חשמל על ידי חוות שרתים.³⁷ בכתבה בנושא, למשל, מצוטט בכיר במכון מחקר העוסק בתחום כאומר שנכון ל-2024 השימוש בבינה מלאכותית צורך בין 10%-20% מצריכת החשמל של חוות השרתים בארה"ב, אך שיעור זה צפוי "לגדול משמעותית" בעתיד,³⁸ וחברת טכנולוגיה המפעילה חוות שרתים דיווחה כי בשנת 2023 כ-8% מצריכת החשמל בחוות השרתים שלהם היה לצורך בינה מלאכותית, והם צופים שבשנת 2028 יהיה מדובר בשיעור של 15% עד 20%.³⁹ שיעור דומה (19% בשנת 2028) מוצג על ידי תחזיות של חברת גולדמן זקס

³² IBM, [What is a Data Center?](#), September 4th 2024; Amazon Web Services, [What is a Data Center?](#), accessed: October 29th 2024.

³³ U.S. Department of Energy, [Buildings: Data Centers and Servers](#), accessed: October 29th 2024.

³⁴ International Energy Agency, [Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026](#), January 2024, p. 31.

³⁵ European Commission Joint Research Centre, [Energy Consumption in Data Centres and Broadband Communication Networks in the EU](#), February 2024, pp. 12-14.

³⁶ International Energy Agency, [Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026](#), January 2024, p. 35.

³⁷ McKinsey & Company, [AI power: Expanding data center capacity to meet growing demand](#), October 29th 2024; IDC, [IDC Report Reveals AI-Driven Growth in Datacenter Energy Consumption, Predicts Surge in Datacenter Facility Spending Amid Rising Electricity Costs](#), September 24th 2024, accessed: November 5th 2024. EPRI, [Powering Intelligence: Analyzing Artificial Intelligence and Data Center Energy Consumption](#), May 28th 2024, pp. 14-17; Rhodium Group, [Taking Stock 2024: US Energy and Emissions Outlook](#), July 23rd 2024, p. 8.

³⁸ TIME, [How AI Is Fueling a Boom in Data Centers and Energy Demand](#), June 12th 2024, accessed: November 5th 2024.

³⁹ Schneider Electric, [The AI Disruption: Challenges and Guidance for Data Center Design](#), December 6th 2023, p. 2.

(Goldman Sachs).⁴⁰ יש לציין שגם לאחר גידול כמו אלה שתוארו לעיל, מרבית השימוש בחוות השרתים צפוי להיות לשימושים אחרים, שגם היקף השימוש בהם צפוי לגדול (גם אם בשיעור נמוך יותר).³⁶

מחשבים בחוות שרתים, מקור:
Google Data Centers, [Data](#)
[and Security](#), תאריך כניסה: 29
באוקטובר 2024



השיעור היחסי של
חוות השרתים מכלל
צריכת החשמל שונה
בכל מדינה: בשנת
2022 חוות שרתים
צרכו 17% מהחשמל
באירלנד, אך רק כ-
4% מצריכת החשמל
בארה"ב

יש להדגיש ששיעור צריכת החשמל משתנה ממדינה למדינה, לפי הפריסה הגיאוגרפית של חוות השרתים: בארה"ב, למשל, בה ממוקמים כ-33% מחוות שרתים אלה, צריכת החשמל של חוות השרתים היוותה כ-4% מכלל צריכת החשמל הלאומית, וצפויה לעלות בשנת 2026 ל-6.4%.⁴¹ להבדיל ניתן לראות את אירלנד, מדינה קטנה יותר שבתחילת שנת 2024 נמצאו בה 82 חוות שרתים, עם כ-55 חוות נוספות בתהליך הקמה או אישור. צריכת החשמל של החוות הללו באירלנד בשנת 2022 היוותה כ-17% מכלל צריכת החשמל במדינה, שיעור שצפוי לעלות ל-32% בשנת 2026.

העלייה בצרכי
האנרגיה הביאה
חברות טכנולוגיה
לחיפוש פתרונות
להגדלת הספק
החשמל של חוות
השרתים, כולל הקמת
חוות בסמיכות
לתחנות כוח קיימות,
הפעלה מחדש של
תחנות כוח שנסגרו,
והקמה של כורים
גרעיניים ייעודיים

בנוסף, עם השיפורים בטכנולוגיה, סביר שדרישות האנרגיה יעלו גם הן: לפי פרסום של הפורום הכלכלי העולמי, ה"אימון" של מודל הבינה המלאכותית GPT-4 דרש פי 50 יותר חשמל מאשר האימון המקביל של המודל הקודם, GPT-3.⁴² בשל סיבות אלה ועוד, ה-IEA מציין כי יש צורך בהסדרה עדכנית ובשיפורים טכנולוגיים, בין היתר בנוגע ליעילות בצריכת החשמל, כדי להתמודד עם העלייה הצפויה בביקוש.⁴³ מנגד, ניתן לטעון כי למרות ש"אימון" המערכת צורך יותר חשמל, יעילות המודלים במענה לשאלות לאחר מכן היא במגמת עלייה, כלומר צריכת החשמל למענה לשאלות תהיה נמוכה יותר. כמו כן, ישנם פיתוחים מצד חברות הבינה

⁴⁰ Goldman Sachs, [AI is Poised to Drive 160% Increase in Data Center Power Demand](#), May 14th 2024, accessed: November 5th 2024.

⁴¹ International Energy Agency, [Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026](#), January 2024, p. 32.

⁴² World Economic Forum, [AI and energy: Will AI Help Reduce Emissions or Increase Demand? Here's What to Know](#), July 22nd 2024, accessed: September 26th 2024.

⁴³ International Energy Agency, [Electricity 2024: Analysis and Forecast to 2026](#), January 2024, p. 8.

המלאכותית ומפעילות חוות השרתים להפחתת צריכת החשמל בהפעלת החוות והמודלים של בינה מלאכותית.⁴⁴

העלייה בצרכי האנרגיה הביאה חברות טכנולוגיה שונות לחיפוש פתרונות להגדלת הספק החשמל של חוות השרתים. למשל, חברת הטכנולוגיה מיקרוסופט הכריזה בספטמבר 2024 על הסכם לרכישת חשמל בפנסילבניה שבארה"ב, שיביא להפעלתה מחדש של תחנת כוח גרעינית שנסגרה ב-2019.⁴⁵ לפי דיווח בעיתונות הכלכלית בארה"ב, חברת אורקל מעצבת חוות שרתים שתופעל על ידי שלושה כורים גרעיניים קטנים ייעודיים (modular nuclear reactors),⁴⁶ וחברת אמזון השקיעה באחרונה בפרויקטים לפיתוח כורים גרעיניים ייעודיים.⁴⁷ להבדיל מהשימוש הייעודי בכורים, ניתן לראות שחברת אמזון רכשה מתחם של חוות שרתים שנמצא צמוד לתחנת כוח גרעינית (ומחובר אליה ישירות) במרץ 2024.⁴⁸

3.2 ההשפעה הסביבתית של הגידול בצריכת החשמל

לשימוש בחשמל ובאנרגיה יש קשר, בין היתר, להיבטים סביבתיים. בפרט, היקף הדרישה לחשמל משליך על היקף פליטות גזי החממה הנגרם כתוצאה מייצור אותו חשמל, כתלות באופן ייצור החשמל. כך, למשל, הפנייה לכוח גרעיני, שנחשב אופן ייצור חשמל נטול פליטות גזי חממה יחסית לאופני ייצור אחרים, נובעת, בין היתר, מהמחויבות של חברות הטכנולוגיה הללו להפחתת פליטות.

המחויבות של חברות הטכנולוגיה להפחתת פליטות מבוססת הן על דרישות רגולטוריות מצד ממשלות, והן על אינטרסים עסקיים, כגון שיפור יעילות והפחתת הוצאות, ניצול תמריצים ממשלתיים לחברות הצורכות חשמל ממקור מתחדש, אימוץ עקרונות אחריות תאגידית חברתית-סביבתית (ESG) ושיפור התדמית הציבורית של החברה.

להלן מוצג מידע נוסף על מחויבויות כאלו: מיקרוסופט, למשל, התחייבה להוריד את פליטת גזי החממה הקשורה לייצור חשמל לשימוש החברה לרמה הקרובה לאפס (ולהפחית בחצי פליטות עקיפות שאינן קשורות לחשמל) עד שנת 2030.⁴⁹ חברת גוגל מתעתדת להגיע לאפס פליטות

הפיתוח והשימוש בכלי בינה מלאכותית תרם לכך שחברות טכנולוגיה גדולות לא עמדו ביעדים שהציבו לעצמן להפחתת פליטת גזי חממה

⁴⁴ World Economic Forum, [AI and energy: Will AI Help Reduce Emissions or Increase Demand? Here's What to Know](#), July 22nd 2024, accessed: September 26th 2024.

⁴⁵ Microsoft, [Accelerating the Addition of Carbon-Free Energy: An Update on Progress](#), September 20th 2024, accessed: September 26th 2024.

⁴⁶ CNBC, [Oracle is Designing a Data Center that would be Powered by Three Small Nuclear Reactors](#), September 10th 2024, accessed: September 26th 2024.

⁴⁷ Amazon, [Amazon Signs Agreements for Innovative Nuclear Energy Projects to Address Growing Energy Demands](#); CNBC, [Amazon Goes Nuclear, to Invest more than \\$500 million to Develop Small Modular Reactors](#), October 16th 2024, accessed: October 29th 2024.

⁴⁸ American Nuclear Society, [Amazon buys nuclear-powered data center from Talen](#), March 7th 2024, accessed: September 26th 2024.

⁴⁹ Microsoft, [Corporate Social Responsibility: Carbon Reduction](#), accessed: September 26th 2024.

בפעילות החברה עד שנת 2030, וחברת אמזון עד 2040, כאשר לפי הצהרת החברה בשנת 2023 הם הגיעו למצב שבו החשמל שנעשה בו שימוש על ידי אמזון היה בהיקף שווה לייצור חשמל ממקורות מתחדשים (matched with renewable energy sources).⁵⁰

עם זאת, ניתן לטעון שהתחייבויות אלה עומדות בסתירה לעלייה בפועל בפליטות גזי החממה בפעילות החברות בשנים האחרונות: לפי דיווח של מיקרוסופט, פליטות גזי החממה (ביחידות שווה ערך פחמן דו-חמצני) מכלל פעילות החברה עלו בין 2020 ו-2023 בכ-29.1%, כאשר עיקר העלייה יוחס להקמת חוות שרתים נוספות.⁵¹ לפי דיווח של חברת גוגל, פליטות גזי החממה מכלל פעילות החברה עלו בין 2020 ו-2023 בכ-66%, כאשר העלייה בשנת 2023 מיוחסת בעיקר לעליית צרכי החשמל של חוות השרתים, ולפליטות נוספות בשרשרת האספקה.⁵² יש לציין שגם חברת אמזון הציגה עלייה של 13.4% בפליטות הפחמן הדו-חמצני ומקביליו בין השנים 2020 ו-2023, אך בניגוד למיקרוסופט וגוגל, בהן יש מגמת עלייה קבועה מאז 2020, באמזון שנת השיא הייתה 2021, ובשנים 2022 ו-2023 יש ירידה.⁵³ כמו כן, החברות נוקטות בצעדים לאיזון הפליטות הללו, במטרה להגיע לנטו אפס פליטות.

היבטים סביבתיים נוספים של עליית השימוש בחוות שרתים כוללים את הזיהום הנוצר בבניית החוות וביצירת המחשבים הנדרשים, עלייה בצריכת המים, גידול בפסולת האלקטרונית וזיהום סביבתי אפשרי מכיוון שהפסולת הזו כוללת לעתים חומרים רעילים כמו עופרת וכספית.⁵⁴ מסמך זה לא עוסק בהיבטים אלה.

3.3 צעדי מדיניות הננקטים על ידי מדינות וגופים בין לאומיים: דוגמאות

ממשלות וגופים בין לאומיים החלו להידרש לצריכת החשמל המדוברת בכל הנוגע לפיתוח הבינה המלאכותית וההתעצמות הטכנולוגית. יש לציין כי, כאמור לעיל, חלק מהצעדים הרלוונטיים לא ממוקדים בבינה מלאכותית, אלא בחוות שרתים באופן רחב. לפי דוח בנושא שפורסם בפברואר 2024, צעדי המדיניות יכולים לכלול התערבות ממשלתית "נוקשה" יותר, כמו קביעת תקנים מחייבים ליעילות אנרגטית ודרישת אישור ממשלתי להקמת או הפעלת חוות שרתים, או צעדים "רכים" יותר, כמו הסכמים התנדבותיים, תמריצים ממשלתיים ועוד.⁵⁵

צעדי מדיניות
להתמודדות עם
הגידול בדרישת
אנרגיה מצד חוות
שרתים כוללים
התערבות ממשלתית
"נוקשה", כמו קביעת
תקנים מחייבים
ליעילות אנרגטית
ודרישת אישור
ממשלתי להקמת או
הפעלת חוות שרתים,
או צעדים "רכים"
יותר, כמו הסכמים
התנדבותיים
ותמריצים ממשלתיים

⁵⁰ Google, [Tracking our Carbon-Free Energy Progress](#); Amazon, [Carbon Free Energy](#), accessed: September 26th 2024.

⁵¹ Microsoft, [2024 Environmental Sustainability Report](#), May 15th 2024, p. 5.

⁵² Google, [2024 Environmental Report](#), July 2024, pp. 7, 31.

⁵³ Amazon, [2023 Sustainability Report](#), July 2024, p. 12.

⁵⁴ UN Environmental Programme, [AI has an Environmental Problem. Here's what the World can do about That](#), September 21st 2024, accessed: October 9th 2024.

⁵⁵ Electronic Devices & Networks Annex EDNA, [Policy Development on Energy Efficiency of Data Centers](#), February 2024, p. 1.

להלן יובאו מספר דוגמאות להתייחסות ממשלתית לנושא. יודגש כי מדובר בדוגמאות בלבד, שנועדו להציג גישות שונות, ולא בסקירה מקיפה.

- האיחוד האירופי:

○ באוקטובר 2023 נכנסה לתוקף דירקטיבה בנושא יעילות אנרגטית, שכללה התייחסות מפורשת לחוות שרתים כצרכניות אנרגיה משמעותיות. הדירקטיבה כללה הנחיה כללית לחוות שרתים (הצורכות מעל 500 kW) במדינות החברות באיחוד לפרסם מידע על היעילות האנרגטית שלהן.⁵⁶

○ בהמשך לכך, במרץ 2024 אימצה הנציבות האירופית רגולציה ממוקדת, כשלב ראשון בכינון מערכת למתן ניקוד לחוות שרתים על מידת היותם בני-קיימא.⁵⁷ הרגולציה הזו עוסקת בגיבוש המדדים ובשקיפות ולא קובעת מגבלות או תקנים, אך מידע זה יוכל לשמש בעתיד לקבלת החלטות נוספת.

○ ביוני 2024 התקבל באיחוד האירופי חוק הבינה המלאכותית, הכולל הוראה לגיבוש תקן אחיד של מדדים לצריכת המשאבים והאנרגיה של בינה מלאכותית בסיכון גבוה.⁵⁸

○ באוגוסט 2024 פרסמה הנציבות מכרז לפיתוח שיטת מדידה לפליטות במסגרת פיתוח בינה מלאכותית באיחוד האירופי.⁵⁹ המכרז אמור לכלול התייחסות לאופן יישום המדידה ברגולציה, ולזיהוי ועידוד פתרונות להגברת היעילות האנרגטית. המכרז המדובר הוא חלק מיישום הוראות חוק הבינה המלאכותית, כאמור. המכרז נסגר ב-23 בספטמבר, ונכון לזמן כתיבת מסמך זה טרם פורסמו תוצאותיו.

ביוני 2024 התקבל באיחוד האירופי חוק הבינה המלאכותית, הכולל הוראה לגיבוש תקן אחיד של מדדים לצריכת המשאבים והאנרגיה של בינה מלאכותית בסיכון גבוה

⁵⁶ [Directive \(EU\) 2023/1791 of the European Parliament and of the Council of 13 September 2023 on energy efficiency and amending Regulation \(EU\) 2023/955 \(recast\) \(Text with EEA relevance\)](#), article 12.

⁵⁷ European Commission, [Data Centres in Europe – Reporting Scheme; Commission Adopts EU-Wide Scheme For Rating Sustainability Of Data Centres](#), March 15th 2024, accessed: September 29th 2024.

⁵⁸ ההגדרה עבור "בינה מלאכותית בסיכון גבוה" (High-Risk AI) מפורטת בהרחבה בחקיקה האירופאית, וכוללת מערכות בינה מלאכותית המהוות את רכיב הבטיחות במוצר רחב יותר, או אם מערכת הבינה המלאכותית עצמה כמוצר, היא תחת רגולציות אירופאיות מסוימות. בנוסף, כל מערכת בינה מלאכותית נחשבת בסיכון גבוה אם היא עוסקת בשורת נושאים כגון זיהוי ביומטרי, תהליכים דמוקרטיים, אכיפת חוק, מערכת המשפט, תשתיות חיוניות, תהליכים בתחום החינוך (מתן גישה למוסדות חינוך, הערכה חינוכית ומתן ציונים, פיקוח על סטודנטים ותלמידים בבחינות ועוד), גיוס וניהול משאבי אנוש, תחומים הנוגעים להגירה ועוד.

[Regulation \(EU\) 2024/1689 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 laying down harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations \(EC\) No 300/2008, \(EU\) No 167/2013, \(EU\) No 168/2013, \(EU\) 2018/858, \(EU\) 2018/1139 and \(EU\) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, \(EU\) 2016/797 and \(EU\) 2020/1828 \(Artificial Intelligence Act\)](#), articles 40, 113, annex III.

⁵⁹ European Union Funding & Tenders Portal, [Development of a Study to Measure and Foster Energy Efficient and Low Emission Artificial Intelligence in the EU, EC-CNECT/2024/OP/0066](#), published: August 6th 2024, accessed: September 29th 2024.

נקודה למחשבה: בתחומי האיחוד האירופי קיים הסכם לא מחייב להגעה לניטרליות אקלימית,⁶⁰ אליו מוזמנות חוות שרתים להצטרף באופן התנדבותי. ההסכם כולל נכון להיום 28 ארגונים לאומיים של חוות שרתים ו-98 חברות המפעילות חוות שכאלה.⁶¹ ההסכם כולל מחויבות ליעד של האיחוד האירופי: הגעה לניטרליות אקלימית עד שנת 2050, תוך שאיפה לניטרליות אקלימית של חוות השרתים עד שנת 2030. מדובר בהתארגנות שאינה ממשלתית, אך לפי אתר היוזמה, הרגולציה העצמית המוצעת דרכה פותחה בשיתוף הנציבות האירופית.⁶²

- אירלנד:

- כפי שהוזכר במסמך זה, אירלנד היא מדינה בה צריכת החשמל של חוות השרתים מהווה שיעור גבוה יחסית מצריכת החשמל הכללית. זאת, בין היתר, בשל תנאי מיסוי המושכים למדינה חברות טכנולוגיה.⁶³
- בשנת 2022 פורסמה הצהרה של הממשלה בנושא מקומן של חוות השרתים בחזון היזמות הלאומי, שהכירה בחוות אלה כ"שחקניות חיוניות בכלכלה ובחברה" (של אירלנד).⁶⁴ הצהרה זו עדיין משקפת את האסטרטגיה של ממשלת אירלנד, נכון ליולי 2024, כך לפי מענה של שר בממשלה לפרלמנט האירי.⁶⁵ יש לציין כי בכתיבת מסמך זה לא נמצא מידע נוסף על מדיניות ממשלתית באירלנד העוסקת באופן ממוקד בחוות השרתים ובצריכת החשמל שלהם.
- כחברה באיחוד האירופי, הצעדים שהוזכרו בנוגע לאיחוד כוללים את אירלנד.
- חוות השרתים מוזכרות בתוכנית האקלים הלאומית כצרכן אנרגיה משמעותי, שיהיה צורך בטווח הקצר והבינוני לתאם את אספקת החשמל עבורו במסגרת דרישות נוספות לאנרגיה, כדי להבטיח הספקת חשמל סדירה ועמידה בתוכנית תקצוב הפחמן במדינה.⁶⁶

ממשלת אירלנד
הכירה בחוות
השרתים כ"שחקניות
חיוניות בכלכלה
ובחברה, ובמסגרת
כתיבת מסמך זה לא
נמצאו צעדי מדיניות
לאומית העוסקים
באופן ממוקד
בצריכת החשמל של
חוות אלה

⁶⁰ ניטרליות אקלימית היא מאזן פליטות שבו הגזים הנפלטות לאטמוספירה כחלק מן הפעילות האנושית מקוזזים על ידי הגזים המוצאים ממנה כחלק מן הפעילות האנושית בפרק זמן נתון. יהודה טרואן, [שינוי האקלים העולמי: אתגרים, השלכות ומדיניות בעולם ובישראל](#), מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 5 בדצמבר 2023, עמ' 56.

⁶¹ Climate Neutral Data Centers, [Signatories](#), [Home](#), accessed: September 29th 2024.

⁶² Climate Neutral Data Centers, [CNDP Achieves Key Milestones with European Commission and Industry Backing](#), June 22nd 2021, accessed: September 29th 2024.

⁶³ Oireachtas Library & Research Service, [Data Centres and Energy](#), July 23rd 2024, p. 6.

⁶⁴ Government of Ireland, [Government Statement on The Role of Data Centres in Ireland's Enterprise Strategy](#), July 27th 2022.

⁶⁵ Houses of the Oireachtas, [Parliamentary Question: Data Centres](#), July 23rd 2024.

⁶⁶ Government of Ireland, [climate Action Plan 2023 CAP23: Changing Ireland for the Better](#), December 2022, p. 139.

- באחת מחוות השרתים נעשה שימוש בחום השירי הנוצר בשל הפעלת המחשבים כחלק ממערכת לחימום בתים קרובים.⁶⁷

- ארה"ב:

- משרד האנרגיה של ממשלת ארה"ב מפעיל תוכנית פדרלית לניהול אנרגיה, במסגרתה פורסם מדריך לעיצוב חוות שרתים באופן יעיל אנרגטית.⁶⁸ התוכנית כוללת תמיכה בהכשרות שונות בתחום היעילות האנרגטית, ובכלל זאת הכשרות המלמדות על יעילות אנרגטית בחוות שרתים.⁶⁹ לפי דיווח של המשרד, הוא ממשיך לפתח את היכולות בתחום ניתוח צריכת האנרגיה של חוות שרתים, והסיוע לחוות בשיפור הצריכה, כמו גם משקיע בפיתוח אמצעי קירור יעילים יותר לחוות.⁷⁰
- הארגון Energy Star, ארגון בתמיכה ממשלתית המציע תו תקן ליעילות אנרגטית, פרסם במאי 2023 מדריך לפעילות מיטבית של חסכון באנרגיה לחוות שרתים, שנכתב בשיתוף הסוכנות הפדרלית להגנת הסביבה.⁷¹ המדריך הוא בן עמוד אחד בלבד, אך מפנה לאתר של Energy Star, בו מופיע מידע נוסף.⁷²

- סין:

ביולי 2024 פרסמה ממשלת סין תוכנית פעולה לפיתוח "ירוק" של חוות שרתים, המציבה שורת יעדים, בהם: להגדיל את השימוש באנרגיה ממקורות מתחדשים בחוות שרתים ב-10% מידי שנה, לשפר את יעילותן האנרגטית (עד לציון יעילות שימוש באנרגיה (PUE) ממוצע של פחות מ-1.5) עד 2025, ולהגיע עד שנת 2030 ליעילות אנרגטית של חוות שרתים ברמה הנחשבת למתקדמת ברמה בין לאומית.⁷³ יש לציון שלפי המעבדה הלאומית לאנרגיה מתחדשת (NREL) של משרד האנרגיה הפדרלי של ארה"ב, ציון ה-PUE הממוצע

משרד האנרגיה של
ממשלת ארה"ב
מפעיל תוכנית
פדרלית לניהול
אנרגיה, במסגרתה
פורסם מדריך לעיצוב
חוות שרתים באופן
יעיל אנרגטית

ממשלת סין פרסמה
ביולי 2024 תוכנית
פעולה לפיתוח
"ירוק" של חוות
שרתים, הכוללת
שורת יעדים וחתימה
לשיפור משמעותי של
יעילות השימוש
באנרגיה בחוות אלה

⁶⁷ Government of Ireland, [Press Release: Minister Ryan launches report paving the way for the expansion of district heating to Irish homes and businesses by 2030](#), August 31st 2023, accessed: October 9th 2024.

⁶⁸ Federal Energy Management Program, [Best Practices Guide for Energy-Efficient Data Center Design](#), July 26th 2024.

⁶⁹ Federal Energy Management Program, [Federal Energy Management Program Training Catalog](#), accessed: October 9th 2024.

⁷⁰ U.S. Department of Energy, [AI for Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy](#), April 2024, p. 38.

⁷¹ Environmental Protection Agency, [U.S. EPA's ENERGY STAR Program Develops Energy-Saving Guidance for Co-Location Data Centers in Collaboration with Equinix and Iron Mountain](#), May 17th 2023, accessed: September 29th 2024.

⁷² Energy Star, [Data Centers](#), accessed: September 29th 2024.

⁷³ The State Council of the People's Republic of China, [China Sets Green Targets for Data Centers](#), July 24th 2024, accessed: September 29th 2024.

לחוות שרתים הוא 1.8, וחוות שרתים שבה נעשה מאמץ ממוקד ביעילות אנרגטית תוכל להגיע לציון של 1.2 או נמוך מכך.⁷⁴

- גרמניה:

בגרמניה חוות שרתים
נדרשות להשתמש
בשיעור מסוים של
חשמל ממקורות
מתחדשים. בבריטניה
ובצרפת ניתן פטור
ממס מסוים לחוות
העומדות
בקריטריונים

חקיקה פדרלית ליעילות אנרגטית מנובמבר 2023, שיש בה סעיפים ייעודיים לחוות שרתים, מחייבת חוות שרתים חדשות לצרוך לפחות 50% מהחשמל ממקורות מתחדשים ולהשתמש באחוז מסוים (10%-20%) מהחום השיורי (הנוצר במבנה בשל פעולת המחשבים) לצרכים אחרים. זאת, תוך דרישת עמידה ביעדי יעילות אנרגטית.⁷⁵

- צרפת:

חוות שרתים העומדות בקריטריונים מסוימים של יעילות אנרגטית יזכו בפטור, חלקי או מלא, ממס שמוטל על צריכת חשמל.⁷⁶

- בריטניה:

- בבריטניה ישנה אפשרות לחברות המעוניינות בהפחתת מיסוי הפחמן המוטל עליהן לקבל הקלות אם הן עומדות בקריטריונים מסוימים ליעילות אנרגטית או לצמצום פליטות, הנקבעים בנפרד לכל תעשייה. הסכם בנושא מגובש בין הממשלה לבין אגודה מקצועית בכל ענף.⁷⁷ ביולי 2014 פורסמו התנאים לענף חוות השרתים⁷⁸
- בנובמבר 2023 פורסמה יוזמה להשתמש בחום העודף הנוצר בחוות השרתים כדי לחמם בתים, משרדים וחללים מסחריים. ממשלת בריטניה השקיעה 36 מיליון ליש"ט בפרויקט למטרה זו.⁷⁹ יש לציון כי מדובר ביוזמה של ממשלה קודמת, ולא נמצא מידע על מידת ההצלחה של יוזמה זו.

- הולנד: בשנת 2019 נוספו חוות השרתים לרשימת הפעילויות המוסדרות בחוק לחסכון באנרגיה משנת 2008. חוות השרתים נדרשות ליישם את הצעדים האפשריים שתקופת

⁷⁴ National Renewable Energy Laboratory, Department of Energy, [High-Performance Computing Data Center Power Usage Effectiveness](#), accessed: October 29th 2024.

⁷⁵ [Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz in Deutschland 1 \(Energieeffizienzgesetz - EnEg\), § 11 Klimaneutrale Rechenzentren](#) (in German); Electronic Devices & Networks Annex EDNA, [Policy Development on Energy Efficiency of Data Centers](#), February 2024, pp. 46-47.

⁷⁶ Labo Société Numérique, [Adoption of the Law to Reduce the Environmental Footprint of Digital Technology](#), November 24th 2021, accessed: September 29th 2024.

⁷⁷ TechUK, [Climate Change Agreements \(CCA\) for Data Centres](#), November 14th 2023, accessed: September 30th 2024.

⁷⁸ UK Environment Agency, [Climate Change Umbrella Agreement for the Data Centre Sector](#), July 24th 2014.

⁷⁹ Department for Energy Security and Net Zero, [Thousands of Homes to be Kept Warm by Waste Heat from Computer Data Centres in UK First](#), November 3rd 2023, accessed: September 29th 2024.

ההחזר הכלכלי על יישומם היא של חמש שנים או פחות (לפי תחשיב המפורט באתר הממשלה ולפי שיקול דעתה של סוכנות ממשלתית רלוונטית), **או** לנקוט בכל הצעדים לשיפור היעילות האנרגטית המפורטים ברשימה ממשלתית מרכזית.⁸⁰ הצעדים המפורטים ברשימה לשיפור יעילות האנרגטית של חוות שרתים נכון לזמן כתיבת מסמך זה, הם: העלאת הטמפרטורה המשמשת לקירור השרתים ל-27 מעלות; שימוש בבקר תדירות להגבלת החשמל למערכות קירור; וקירור באמצעות שימוש באוויר חיצוני.⁸¹

- סינגפור:

**ממשלת סינגפור
אסרה בשנת 2019
על הקמת חוות
שרתים חדשות
והחלה תהליך בדיקה
ולמידה כיצד ניתן
לפתח את התעשייה
באופן בר-קיימא**

- בשנת 2019 ממשלת סינגפור אסרה על הקמת חוות שרתים חדשות (בין היתר על מנת להפחית את הדרישות האנרגטיות של הקמת החוות) והחלה תהליך בדיקה יחד עם חברות בתחום, כדי לקבוע פרמטרים להקמת חוות שרתים וללמוד כיצד ניתן לפתח את התעשייה הזו באופן בר-קיימא.⁸²
- ביולי 2022, במסגרת פיילוט, הרשויות בסינגפור פרסמו קול קורא לחברות בתחום להצעות להקמת חוות שרתים בהתאם לתו תקן ירוק⁸³ ותוך עמידה ביעדים של יעילות אנרגטית והפחתת פליטות באמצעות מקורות אנרגיה מתחדשים.⁸⁴ ביולי 2023 פורסם כי נבחרו ארבע הצעות במסגרת הפיילוט.
- במאי 2024 פורסמה "מפת דרכים לחוות שרתים ירוקות".⁸⁵ תוכנית זו מכירה בחשיבות של בינה מלאכותית לחברה ולכלכלה במדינה, ובו בזמן בעלות הסביבתית של התשתיות הנדרשות לבינה מלאכותית. התוכנית כוללת שתי חזיתות בהן הממשלה והתעשייה נדרשות לפעול בשיתוף: האצת ההתייעלות האנרגטית של חוות שרתים, והאצת השימוש באנרגיה "ירוקה" כחלק מהגידול

⁸⁰ Netherlands Enterprise Agency, [Power Management Guide for Data Centers](#), March 2022; [What is the Energy Saving Obligation?](#), September 29th 2023, accessed: September 30th 2024.

⁸¹ Netherlands Enterprise Agency, [Informatiebank Erkende maatregelen energiebesparing \(EML\)](#) (in Dutch), accessed: September 30th 2024; Electronic Devices & Networks Annex EDNA, [Policy Development on Energy Efficiency of Data Centers](#), February 2024, p. 49.

⁸² Ministry of Digital Development and Information, [MCI's Response to PQ on Advancements in Data Centre Efficiency by Singapore Companies](#), July 2nd 2024; Green Finance Industry Taskforce, [Identifying a Green Taxonomy and Relevant Standards for Singapore and ASEAN](#), May 12th 2022, accessed: October 29th 2024.

⁸³ Infocomm Media Development Authority, [GM NDC: 2019 - BCA-IMDA Green Mark for Data Centres](#), accessed: September 30th 2024.

⁸⁴ Infocomm Media Development Authority, [Launch of Pilot Data Centre - Call for Application \("DC-CFA"\) to Support the Sustainable Growth of DCs](#), July 20th 2022, accessed: September 30th 2024.

⁸⁵ Infocomm Media Development Authority, [Green Data Centre \(DC\) Roadmap](#), May 30th 2024, accessed: September 30th 2024.

בתחום. בתוכנית מוזכר שהממשלה תמשיך לספק תמריצים לקידום התחומים הללו.⁸⁶ במהלך כתיבת מסמך זה לא נמצא מידע על יישום התוכנית.

בדוגמאות שהובאו לעיל ניתן לראות שימוש במגוון כלים, כגון: הפסקת הקמת חוות עד ליצירת סטנדרט מסוים, קביעת סטנדרטים ששחקנים פרטיים נדרשים לעמוד בהם, פירוט צעדים מסוימים הנדרשים להתייעלות אנרגטית, תמריצים כהטבות במיסוי, הצעת תמיכה לא מחייבת להתייעלות, ועוד. יש לציין כי מדובר בצעדים שננקטו בשנים האחרונות, ולא נמצא מידע האומד את מידת יעילותם. כמו כן, יובהר כי הצעדים המדוברים הם דוגמאות וחלק ממכלול שיקולים, מגבלות ומדיניות שונה בכל מדינה, ומכאן לא ניתן להשוות או לאמץ צעדים כאלה בלי מידע נוסף.

3.4 צריכת החשמל של "חוות שרתים" והשפעתה על משק האנרגיה בישראל

מרכז המחקר והמידע של הכנסת פנה אל גורמי הממשלה והרגולציה הרלבנטיים לתחום האנרגיה בבקשה להתייחסות לתמונת המצב הנוכחית של צריכת האנרגיה של חוות שרתים ויישומי AI בישראל ולהשפעותיו על משק האנרגיה בעתיד. להלן יוצגו עיקרי הממצאים בהתבסס על המענים שהתקבלו.

חוות שרתים מאפשרות אחסון מידע מהיר יותר, מסייעות במניעת דלף מידע והן גם תשתית תומכת לצמיחת תעשיית ההיי-טק ולפיתוח יכולות בתחום הבינה המלאכותית

גורמים שונים התייחסו לחשיבות הקמת חוות שרתים בישראל. לתפיסתם, חוות השרתים מאפשרות למידע הכרחי להפעלת שירותים מקומיים להיות מאוחסן בארץ ובכך מנטרלות תלות בתשתית הסיבים האופטיים לחו"ל ומאפשרות אחסון מידע מהיר יותר ובר קיימא גם במקרים קיצוניים. בנוסף הן בעלות חשיבות אסטרטגית במניעת דלף מידע, והקמתן צפויה לתרום לתמ"ג ולהוסיף מקומות עבודה.⁸⁷ חוות שרתים הן גם תשתית תומכת לצמיחת תעשיית ההיי-טק לרבות פיתוח יכולות בתחום הבינה המלאכותית.⁸⁸

לצד החשיבות של הקמת תשתית אנרגיה עבור חוות השרתים, מציינים בטיט דוח רשות החשמל כי **"ההשפעות של מתקנים אלו על רשת החשמל הן גדולות באופן משמעותי מכל מתקן צריכה אחר"**. האתגרים נובעים בין השאר מהמאפיינים הייחודיים של חוות השרתים אשר משפיעים על צריכת החשמל שלהן: כך לדוגמה, פרופיל הצריכה של חוות שרתים הוא קבוע, קשיח ורציף (24/7); לחוות שרתים רגישות גבוהה מאוד להבטחת רציפות ולאמינות אספקת החשמל, ובשל כך הן כוללות מערכות גיבוי שונות; גודל החיבור הנדרש עבור חוות השרתים הינו בהספק משמעותי מאוד ביחס לשטח המתקן. לשם הדגמה, צוין בדוח כי חוות שרתים בהספק

⁸⁶ Infocomm Media Development Authority, [Driving a Greener Digital Future: Singapore's Green Data Centre Roadmap](#), May 2024, p. 5.

⁸⁷ חברת החשמל, **"תכנית פיתוח רשת החלוקה 2030-2024"**, אוגוסט 2024, עמ' 44-48.

⁸⁸ טיוטה של מסמך של רשות החשמל תחת הכותרת: "חוות שרתים – מגמות, השפעות והשלכות על משק החשמל" התקבל מרותם אליהו, מנהלת אגף בכיר תכנון מדיניות ואסטרטגיה, רשות החשמל, דוא"ל מענה לפניית מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 30 באוקטובר 2024.

של 16 מגוואט המוקמת על 10 דונם שקולה מבחינת הספק החשמל שלה לשכונה בת 4,000 יחידות דיור המוקמת על מאות דונמים.

בבחינת מאפייני צריכת האנרגיה של חוות שרתים בישראל, ניתן להתייחס לכמה היבטים: כמות האנרגיה הנצרכת, סוג החיבורים ופריסתם הגיאוגרפית. לפי רשות החשמל, ממיפוי היוזמות של חוות השרתים בישראל עד כה, עולה שמרבית החוות צפויות להתחבר לרשת המתח הגבוה, בהספקים של עד 16 מגה, וישנה מגמה לבקשת חיבורים גם במתח עליון. יזמי הפרויקטים מבקשים חיבורים במתח גבוה מכמה סיבות: (1) על מנת להימנע מהרגולציה המחייבת אותם בהקמת תחנת משנה, דבר שבדרך כלל לוקח זמן ממושך, הן עבור האישור הססטוטורי והן עבור שלבי הקמת התחנה; (2) פיצול חיבורים במתח גבוה על מנת להגדיל את נאמנות האספקה ולקבל הזנה נוספת משנאי אחר. **מצב זה, שבו מחברים חוות שרתים בהספקים גדולים לתחנות משנה מערכתיות משנה את המאזן בין הרזרבה שנלקחת בחשבון לחיבור צרכני חשמל עתידיים בעת התכנון להקמת תחנת משנה חדשה לבין גודל והספק התחנה.**⁸⁹

מבחינת הפריסה הגאוגרפית של חוות השרתים, מנתוני חברת החשמל ורשות החשמל עולה כי המתקנים הקיימים והמתוכננים ממוקמים במספר מוקדים מרכזיים: שפלה, איילון, מודיעין, ירושלים, וחיפה (ראו לוח 3 להלן). **אזורים אלו הם גם מוקדי צריכת החשמל בישראל כיום, וגם מאופיינים במיעוט מקורות ייצור ולפיכך הם תלויים במידה רבה בפיתוח רשת החשמל.** יצוין כי גם ללא הצורך לתת מענה לחוות השרתים, ישנם חסמים רבים ועיכוב מהותי בפיתוח רשת ההולכה באזורי הביקוש.⁹⁰

הרשות ציינה כי ההספק החזוי של לחיבור חוות שרתים בשנת 2030 במחוז מרכז לבדו הינו בהיקף של כ-500 MW והוא שקול לחיבור של כ-125,000 יחידות דיור ולצריכת חשמל של כחצי מיליון צרכנים. לשם כך, **נדרשת הקמה של חמש תחנות משנה חדשות.** מבחינת מקטע **ייצור החשמל** - מדובר על יכולת של **כשליש מהמחז"מ** הנוסף שאמור לקום בגוש דן עד 2030.

3.4.1 תחזיות צריכת החשמל של חוות שרתים בישראל

תוכנית פיתוח רשת החלוקה של חברת החשמל כוללת התייחסות ספציפית לחוות שרתים ולתחזית לתוספת ההספק. לפי התוכנית, תחזית תוספת ההספק עבור חוות שרתים עומדת על כ-1,312 MVA (מגה וולט אמפר) עד לשנת 2030 כפי שניתן לראות בפירוט בטבלה להלן.⁹¹

⁸⁹ שם.

⁹⁰ שם.

⁹¹ חברת החשמל, "תכנית פיתוח רשת החלוקה 2024-2030", אוגוסט 2024, עמ' 44-48.

חוות השרתים
הקיימות והמתוכננות
ממוקמות באזורים
שהם מוקדי צריכה
ומאופיינים במיעוט
מקורות ייצור. מתן
מענה לצרכי
האנרגיה העתידיים
של חוות השרתים
מצריך הקמת
תשתיות בתחומי
הייצור וההולכה

לוח 3. תכנית עבודה לחיבור הזנה לחוות שרתים לרשת החלוקה לפי מרחבים של חברת

החשמל⁹²

מרחב	תחזית ביצוע 2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	סה"כ (MVA)
אגף רשת חיפה והצפון									
חיפה	45	15	8	32	24	8	24	32	188
העמקים	-	-	32	16	22	9	24	32	135
גליל וגולן	-	-	-	18	24	16	28	18	104
אגף רשת דן והחוף									
דן	-	32	-	62	24	48	16	32	214
שרון	56	64	24	16	40	54	23	9	286
שפלה	32	80	32	25	19	48	32	16	284
אגף רשת ירושלים והנגב									
ירושלים	60	32	64	32	32	16	32	48	316
נגב	-	20	-	16	25	17	46	34	158
איילון	152	65	67	10	18	12	0	7	331
כלל ארצי									
סה"כ (MVA)	345	308	227	227	228	228	227	228	2,018
תחזית משוערת: מימוש 65% מכלל ההזמנות									
סה"כ (MVA)	224	200	148	148	148	148	148	148	1,312
מקדם העמסה מבחינת ההספק ברשת: 80% מגודל החיבור הנדרש									
סה"כ (MVA)	179	160	118	118	119	119	118	118	1,049

לפי נתוני חברת חשמל ניתן להעריך כי חלקו של ההספק המותקן הנדרש עבור חוות שרתים צפוי לגדול מכ-1.5% מכלל ההספק המותקן בשנת 2023 ליותר מ-6% בשנת 2030

אם ממירים את הנתונים המופיעים בטבלה ביחידת הספק המדומה - MVA (Apparent power) ליחידות הספק מותקן MW (מגה וואט)⁹³ ניתן לאמוד את ההספק המותקן הנדרש עבור חוות שרתים בשנת 2030 בכ- MW 1207 (1,312 MVA בתחזית מימוש משוערת של 65% מההזמנות). **בהינתן תחזיות הביקוש של חברת נגה לשנת 2030** (הנעות בין 18,153 לבין MW 19,563 בשעות שיא הביקוש) **המדובר ביותר מ-6% מכלל ההספק המותקן הנדרש באותה שנה.**⁹⁴ **יצוין כי מדובר בגידול משמעותי לעומת תחזית הביצוע של שנת 2023**⁹⁵ (224 MVA המייצגים כ-206 MW) **שהם פחות מ-1.5% מביקוש השיא בשנת 2023** לפי נתוני רשות החשמל.⁹⁶ **כלומר, ההערכה היא כי חלקו של ההספק המותקן הנדרש עבור חוות שרתים צפוי לגדול מכ-1.5% מכלל ההספק המותקן בשנת 2023 ליותר מ-6% בשנת 2030 בשעות**

⁹² שם, טבלה 3.3.4 עמ' 47.

⁹³ באמצעות הכפלת נתון ה-MVA [במקדם ההספק](#) התקני של חברת החשמל שהוא 0.92 מתקבל נתון ה-MW.

⁹⁴ חברת נגה לניהול מערכת החשמל, "תוכנית פיתוח אינטגרטיבית למערכת הייצור והמסירה עד שנת 2030", אוגוסט 2022, עמ' 41 טבלה מס' 3.4. תחזיות ביקוש לפי תרחישים שונים בשנים 2022-2030.

⁹⁵ יצוין כי החישוב מתבסס על נתוני הביצוע החזוי לשנת 2023. לא ברור האם הנתון המוצג לשנה זו כולל גם חיבורים שבוצעו בשנים קודמות. עם זאת, יצוין כי על פי נתוני חברת נגה המופיעים בהמשך המסמך, כיום סך החיבורים בפועל עומד על כ-183 MVA, כלומר נמוך מהחזוי בשנת 2023. ומכאן שחישוב זה יכול לשמש אינדיקציה לחלקן של חוות שרתים מתוך כלל ההספק המותקן.

⁹⁶ רשות החשמל, "נתונים- דוח מצב משק החשמל", 1.4 שיאי ביקוש, 29 באוקטובר 2024.

השיא. בהינתן העובדה כי התנהגות הצריכה של חוות שרתים מתאפיינת בעומס קבוע יחסית לאורך שעות היממה הרי שחלקה מכלל הצריכה בשעות בהן הביקוש לחשמל נמוך, יהיה גבוה יותר מ-6%.

על רקע האמור לעיל, בטיטוט הדוח של רשות החשמל נטען כי **נדרש לבחון את הצורך בהתערבות ממשלתית, ולגבש מדיניות שתוכל לאזן בין היכולת להקים חוות שרתים בישראל לבין הצורך לשמור על גישה לחשמל אמין, בטוח, זמין ובר השגה בכלל חלקי הארץ ולטובת כלל הצרכים המשקיים.**

יצוין כי קיימת אי ודאות באשר להיקף הצריכה החזויה של חוות השרתים בישראל והשפעתה הצפויה על משק החשמל. לפי אמיר ליבנה, סמנכ"ל האסטרטגיה והחדשנות בחברת החשמל, חוות שרתים הן סוג צרכני חשמל שמגדיל משמעותית את הביקוש שלו אך יחד **עם זאת ב-2030 הצרכנים הדומיננטיים במשק ימשיכו להיות צרכני תעשייה גדולים ורכב חשמלי.**⁹⁷

לפי זיו קציר סמנכ"ל ברשות החדשנות ומנהל תוכנית תל"מ לבינה מלאכותית, תחום הבינה המלאכותית נמצא עדיין בשלבים של התפתחות והשתנות מואצת ולכן **בשלב זה קשה מאוד לגבש תחזיות ארוכות טווח באשר לביקושים לאנרגיה מצד יישומים אלה.** לשיטתו עיקר החשיבות כיום היא במעקב אחר ההתפתחויות ובשימור היכולת לתגובה מהירה ויעילה. פורום תל"מ לבינה מלאכותית מצוי בקשר עם משרד האנרגיה כדי לוודא כי מתקיים דיאלוג מקצועי בהיבטים אלה. בין השאר מתייחס קציר למיצוי הספק החשמל בחוות השרתים שקמו בשנים האחרונות. לדבריו, בשנים האחרונות הוקמו בישראל מרכזי נתונים רבים, ובחלק ניכר מהמקרים לא מיצו מרכזי הנתונים האלו את הספק החשמל המתוכנן בהם וישנו עדיין מרחב רב לגידול. בהקשר זה נציין כי לפי הנתונים של חברת נגה, סה"כ גודל חיבור חוות השרתים בישראל כיום הוא כ-183 מגה וואלט אמפר (MVA) **אך בפועל הצריכה הכוללת שלהן בשיא העומס הוא כ-50 מגה וואט (MW) בלבד. סך ההזמנות הכולל לחיבור חוות חדשות בשנים הבאות הוא כיום 1,083 MVA.**⁹⁸

עוד יצוין כי, **לשיטתו של קציר, סביר להניח כי חלק ניכר מצרכי החישוב העתידיים של התעשייה הישראלית יסופקו מתוך מרכזי נתונים הממוקמים בחו"ל,** בשל שתי סיבות עיקריות: (1) מרכזי הנתונים הגדולים בעולם ממוקמים על פי רוב במדינות קרות יותר, או באלו בהן עלות החשמל נמוכה באופן יחסי. זאת מהטעם שצרכי האנרגיה (לחישוב ולקירור) מהווים חלק עיקרי בעלויות ההפעלה של מרכזי נתונים, ומכאן נוצר לחץ כלכלי ברור להוזלה בעלויות אלו; (2) במקרים רבים ישנה חשיבות למיקום תשתית החישוב בסמיכות גיאוגרפית אל משתמשי

⁹⁷ אמיר ליבנה, סמנכ"ל האסטרטגיה והחדשנות של חברת החשמל, שיחת טלפון 5 בנובמבר 2024.

⁹⁸ עו"ד נעם ברימן, היועץ המשפטי ומזכיר החברה, נגה- ניהול מערכת החשמל, דוא"ל מענה לפניית מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 5 בנובמבר 2024.

לפי נציג פורום תל"מ לבינה מלאכותית בשלב זה קשה לגבש תחזיות ארוכות טווח באשר לביקושים לאנרגיה מצד חוות שרתים ויישומי AI. בשנים האחרונות הוקמו בישראל מרכזי נתונים רבים, ובחלק ניכר מהמקרים לא מיצו מרכזי הנתונים האלו את הספק החשמל המתוכנן בהם וישנו עדיין מרחב רב לגידול.

הקצה, וזאת על מנת להקטין את זמני התגובה ולשפר את חווית המשתמש. התעשייה הישראלית היא, מטבעה, מוטת ייצוא, ולכן סביר להניח כי חלק גדול מתשתיות החישוב המשמשות אותה ימוקמו במדינות היעד של החברות הרלוונטיות.⁹⁹

מכאן שעל פי קציר יתכנו שתי מגמות הפוכות: מחד, ההתקדמות הטכנולוגית בתחום הבינה המלאכותית בשנים האחרונות קשורה בקשר חזק עם הגדלת המודלים החישוביים, ומכאן גם בהגדלה בצריכת האנרגיה. מאידך, קולות רבים באקדמיה ובתעשייה מצביעים על כך שקשר זה אינו בר קיימא לאורך זמן. בין היתר, כיוון שעלויות האנרגיה הנדרשות מקשות מאוד על המודל העסקי של החברות העוסקות בתחום, וכנגזרת מהצעדים הגלובאליים למזעור פליטות (לרבות על ידי מיסוי). בשל האמור **מוקדש מאמץ מחקרי ותעשייתי רב למציאת פתרונות חליפיים למשל על ידי טכנולוגיות חישוב חדשניות, על ידי שיפורים אלגוריתמיים, על ידי הקטנה של המודלים תוך שימור היכולות וכדומה.**¹⁰⁰

לפי נציג פורום תל"מ
לבינה מלאכותית,
יתכנו בעתיד מגמות
שונות- מצד אחד
גידול בצריכת
האנרגיה בעקבות
הגדלת המודלים
החישוביים והגדלת
השימוש בכלי AI,
ומצד שני- שיפור
היעילות התפעולית
והאנרגטית של
המודלים והתשתיות

⁹⁹ זיו קציר סמנכ"ל ברשות החדשנות ומנהל תוכנית תל"מ לבינה מלאכותית, דוא"ל מענה לפניית מרכז המחקר והמידע של הכנסת, 31 באוקטובר 2024.

¹⁰⁰ שם.