

לוויתן במדבר: אסטרטגיית מימן לחוסן אנרגטי וגיאופוליטי

תומר דקל

אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

לישראל מאגר דלק פוטנציאלי נרחב, ירוק, חדשני ובלתי נדלה – הפקה המונית של מימן ירוק וכחול בנגב – והחוסן האנרגטי שלה תלוי במידה רבה בהתחברות אליו ובמיצוי הפוטנציאל הטמון בו. לאחר החלשת הציר האיראני האיומים על מדינת ישראל לא נעלמו, גם אם השתנו, ולאיום על משק האנרגיה יש מעמד מיוחד בשל התלות המוחלטת של הכלכלה ושל מערכת הביטחון בו. מאמר זה סוקר את אופי האיומים הגיאופוליטיים העתידיים על שרשרת האספקה ותשתיות האנרגיה של ישראל, תוך התמקדות בייחודו של הנפט ובתלות של ענפי התחבורה והתעשייה בו. נקודת המוצא היא שיש להיערך לעלייתו של "עימות קר" עם טורקיה, ושבמצב זה מוטת השליטה הרחבה שלה על נתיבי אספקת הנפט לישראל יוצרת איום מובהק על חוסן האנרגיה של המדינה. זיהוי האיומים מוביל למענה המערכתי ההכרחי להם – ביזור וגיוון מקורות ההפקה וההולכה. מתוך כך יובהר כי אחד המענים המערכתיים החשובים בנושא טמון בהפקה של מימן ירוק ומימן כחול במארג תשתיות משוכלל שיתבסס בנגב.

מילות מפתח: מימן, נגב, טורקיה, אגירת אנרגיה, חוסן אנרגטי, עימות קר.

מבוא

טורפים את הקלפים כשטורקיה זוכה לבכורה בשולחן המשא ומתן, לחיבוק אמריקאי חם הכולל עסקאות נשק ולדריסת רגל אפשרית בהסדרי היום שאחרי בעזה (לזימי, 2025). נוסף על כך את הנרטיב האימפריאלי הנאו־עות'מני בטורקיה, את מוטת השפעתה בסוריה תחת שלטון אל־ג'ולאני ואת התבססותה בבריתות ובבסיסי צבא לרוחב הים התיכון והים האדום (דקל, 2024; שפנייר וחורב, 2019). מתברר כי טורקיה חותרת להגמוניה אזורית, מביעה עוינות לישראל ותמיכה באויביה, פורשת זרועות ומכתרת את ישראל במעגלים הקרובים וגם הרחוקים (כהן ינר־ג'ק, 2025).

אין ודאות בקרב החוקרים כי נתיב ההסלמה הוא הכרחי, וייתכן שהמדינות ימשיכו לאזן "בכריקת שיניים" את האינטרסים שלהן מבלי להתנגש זו בזו (Epstein, 2025), אך המגמה מדאיגה ביותר ומחייבת היערכות שאינה מבוססת על אופטימיות יתרה. אומנם בניגוד לאיראן, תלותה של טורקיה במערב לא תאפשר לה בקלות להסלים את היחסים (ובוודאי שישראל מנועה מלפעול כנגדה עקב זאת, וגם בשל הכוח הצבאי הטורקי, שאינו בר השוואה לאף אחת מאויבותיה

חוסן אנרגטי לאומי הוא נדבך יסודי בחוסן ביטחוני, כלכלי, סביבתי וגיאופוליטי. מאמר זה בוחן סוגיה זו מתוך שתי נקודות מבט: הראשונה, סקירת האיום העולה מ"מלחמה קרה" בין ישראל לטורקיה הקורמת עור וגידים, ונקודות התורפה בתוך מלחמה זו במגזר האנרגיה; השנייה, המגמה העולמית בתחום דלק המימן, המהווה מענה חשוב לחיזוק החוסן האנרגטי אל מול איום זה. לאחר הגדרת האתגר והמענה המערכתי הנדרש נסקרת אסטרטגיה מוצעת לפיתוח מארג תשתיתי־טכנולוגי של מימן, שעיקרו יתבסס בנגב.

יחסי ישראל-טורקיה המידרדרים כבר הוגדרו כ"מלחמה קרה" (כהן ינר־ג'ק, 2025) בין שתי המעצמות האזוריות החזקות במזרח התיכון שניצבת בפתח, בייחוד לאחר היחלשותו היחסית של הציר האיראני שאיים על שתיהן, בתום סדרת המלחמות שאחרי 7 באוקטובר 2023. התהליך, שהחל בהקצנה ברטוריקה ונמשך באמברגו כלכלי, זוהה בתחילה כמהלך שעשוי לפגוע דווקא בטורקיה ולבודדה מארצות הברית (לינדנשטראוס ודניאל, 2024; Cevic, 2025). ואולם האירועים האחרונים

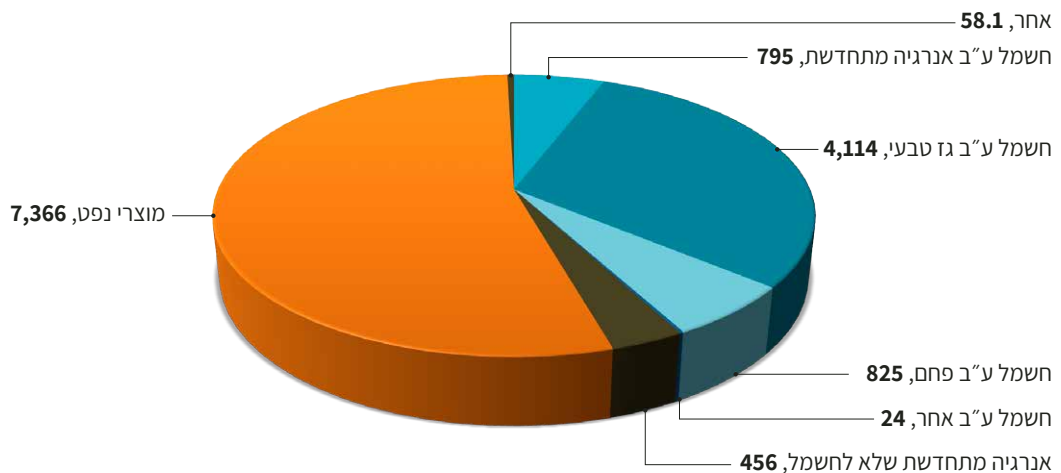
שהישענות על גז מחצבים פוגעת במעמדה של ישראל בבואה לעמוד ביעדי צמצום פליטות הפחמן שלהם התחיבה עד שנת 2030, וליעדים שעליה לקבל על עצמה לקראת 2050 (איגוד הגז הטבעי ו־BDO, 2024; משרד האנרגיה והתשתיות, 2025). הישענות קרובה לבלעדית על משאב התלוי באסדות ובצינורות מבודדים ורגישים למתקפה יוצרת נקודת תורפה – לקח שלמד האיחוד האירופי, אשר נכוה בשל תלותו בגז הרוסי (מדר, 2023). זאת ועוד, הגז אינו מתאים לספק צרכים של מגזרים שונים, בראשם התחבורה והתעשייה הכבדה הנשענים על תוצרי נפט – נושא שמשום מה זכה לתשומת לב מועטה יחסית מצד העוסקים באסטרטגיית החוסן האנרגטי (בניגוד לעיסוק הנרחב בחוסן רשת החשמל). משק האנרגיה הישראלי מבוסס במידה רבה מאוד על דלקי מחצבים (פוסיליים), וחלק חשוב ממנו, בעיקר בתחבורה ובחלק מן התעשייה הכבדה, מבוסס על נפט ותוצריו (ראו תרשים 1). תחזית משרד האנרגיה והתשתיות (2024) צופה כי למרות הקיטון הצפוי בביקוש לתזקי נפט (העומד כיום על 10 מיליון טונות בשנה בקירוב), גם ב־2050 תצרוך ישראל קרוב לשבעה מיליון טונות בשנה. למרות התרחבות השימוש בכלי רכב חשמליים או חשמול התעשייה, אלו אינם צפויים בשום תרחיש סביר להחליף את דומיננטיות הנפט בהם בעשורים הקרובים (בכר, 2024). בהיותה של ישראל "אי אנרגטי" (וינשטוק ואלרן, 2016; פרידמן, 2021), קטיעת שרשרת אספקת הנפט תקרין ישירות על הכלכלה כולה. קטיעה כזו עשויה להתרחש בעקבות החלטות אקראיות של מדינות עוינות. זאת בהשוואה לתרחישי בידוד בענפים אחרים המחייבים תיאום בין המוני שחקנים מתחרים, רובם פרטיים, ומכאן שסבירות מימושם נמוכה. הנפט הגולמי מגיע לישראל ממקורות מועטים, בעיקר ממדינות אגן הים הכספי – אזרבייג'ן וקזחסטן. יחסי ישראל עם מדינות אלו יציבים, אך הבעיה טמונה במדינת המעבר שדרכה חייב הנפט לנוע, טורקיה, בין דרך צינור המגיע לנמל ג'ייהאן או דרך נמלי הים השחור ומצרי הבוספורוס והדרדנלים. הידרדרות היחסים הדיפלומטיים והכלכליים עם טורקיה הובילה לחרם סחורות מצידה, אך תנועת הנפט נמשכת (תחת הלחץ הכריזה אזרבייג'ן שחדלה לייצא לישראל, אך נטען כי הסחר נמשך בפועל דרך חברות מתווכות, ראו: שמיל ושרף, 2025; ניתן לשער שמתוך אינטרס טורקי לא לפגוע בידידותיה המייצאות את הנפט, או בשמה הטוב כמוקד מעבר בין יבשתי לאנרגיה; ראו: אלמס, 2024). אך כאמור, במצב הדברים הנוכחי נדרש להיערך לגרוע ביותר (פלדמן, 2024) ויש להיערך לעצירת סחר הנפט, בין במניעת תנועה שלו דרך חופיה ונמליה של טורקיה, בעצירת מכליות הנעות במרכז הים

מיקוד המאמץ במדיניות האנרגיה הישראלית כיום הוא בפיתוח שדות הגז הטבעי בים התיכון. זהו מרכיב קריטי בהפקת החשמל למשק, אך הוא אינו מבטיח חוסן מלא. מאגרים אלו יידלדלו בסופו של דבר.

האחרות), אך בטווח הבינוני והארוך בהחלט יש להיערך לעימות שעשוי ללבוש צורות שונות שאינן ידועות עדיין – למשל "עימות קר", עימות באמצעות שלוחים (פרוקסי) או תקיפות באמצעים שלא ניתן לשייכם ישירות לטורקיה. ובכל זאת, ישראל טרם גיבשה מדיניות קוהרנטית מול האיום המתהווה, והדיון המחקרי־אסטרטגי במגמה החדשה עודנו בחיתוליו. בעניין זה המאמר נותן את הדעת על המנוף המסוכן שמחזיקה טורקיה מול ישראל בתחום האנרגיה: זוהי מדינת המעבר למרבית הנפט שמייבאת ישראל, החולשת באופנים שונים על כל הצירים הימיים המובילים לישראל ומחזיקה ביכולות ההתקפיות הנדרשות כדי לפגוע במתקני מערכת האנרגיה השונים. רק בניית חוסן המורכב מהפחתת התלות בנפט תאפשר התמודדות ארוכת טווח עם סיכונים אלו, כמו גם עם סיכונים מוכרים יותר, כגון הציר האיראני.

איומים על החוסן האנרגטי של ישראל

החשש לחוסן האנרגטי הלאומי מדייר שינה מעיניהם של קובעי מדיניות, חוקרים ואסטרטגים מזה שנים רבות (למשל, בכר, 2024; גרוסמן ועברון, 2016; וינשטוק ואלרן, 2016; מבקר המדינה, 2020; מדר, 2023; Cohen, 2025). גם בהנחה שאיום הבידוד לא יתממש ("סופר ספרטה", כדברי נתניהו) ושמעמד ישראל ישתקם אחרי המלחמה באופן סביר, יש להביא בחשבון איומים ספציפיים על שרשראות האספקה הגלובליות, שתחום האנרגיה הוא מהקריטיים שבהן (גרוסמן ועברון, 2016; דקל, 2024). האיום העתידי על משק האנרגיה עשוי להתממש בתוך גבולות ישראל במתקפה על תחנות כוח או אסדות גז, קטיעה של קווי מתח או צינורות או מתקפת סייבר על המערכת, שריכוזיותה במתקנים מבודדים יוצרת רגישות רבה (וינשטוק ואלרן, 2016; מדר, 2023; Cohen, 2025). יתרה מכך, גם מחוץ לגבולות מרחף איום מערכתי בדמות מניעת אספקה של חומרי גלם באמצעות עצירת הסחר, סגירת נתיבי הסחר או מתקפה ישירה על הספינות ועל תשתיות ההובלה (דקל, 2024). מיקוד המאמץ במדיניות האנרגיה הישראלית כיום הוא בפיתוח שדות הגז הטבעי בים התיכון. זהו מרכיב קריטי בהפקת החשמל למשק, אך הוא אינו מבטיח חוסן מלא. מאגרים אלו יידלדלו בסופו של דבר, מה גם



תרשים 1: מאזן האנרגיה הלאומי בשנת 2024, צריכה סופית לאנרגיה בשעט"י¹

מקומיים בלבד, בחיפה ובאשדוד, כבר כמעט הובילה את ישראל למשבר אנרגיה, ועוד בעת מלחמה (בנימין, 2025; מוסטקי, 2025).²

מספר פתרונות הוצעו לכך, אך כולם לוקים בחסר. ראשית, הוצע להרחיב את קיבולת אגירת הנפט לעיתות חירום, אך לבד מהעובדה שמדובר בפתרון יקר מאוד, גם מאגרי ענק יוכלו להגדיל את אורך הנשימה בשבועות ספורים, ובוודאי שלא יבטיחו עצמאות אנרגטית אמיתית. שנית, הוצע לפנות לעבר ערב הסעודית ולחבר בין צינור קצא"א (אילת-אשקלון) לבין הצינור הסעודי המגיע לינבוע שלחופי הים האדום. אם יתממש הדבר מדובר בפתרון מערכתי חשוב, אך מובן שלשם כך נדרשת נורמליזציה בין המדינות, השקעות עתק בהקמת הצינור וגם פתרונות מורכבים למניעת סיכוני שפיכת נפט לאורך הדרך או במפרץ אילת, שעלולה להחריב את המערכת האקולוגית ואת תעשיית התיירות בעיר. יתרה מזאת, צינור זה ייצור תלות ישראלית בערב הסעודית. משה בכר (2024) מסביר כי דווקא חיבור קצא"א לערב הסעודית יפחית את הסיכונים למפרץ אילת (בהשוואה לחלופה של קליטת הנפט ממכליות בנמל) ויאפשר הזרמת נפט לאירופה, כשישראל תבצר את מעמדה כמדינת מעבר (transit state), אך כאמור, כל זה תלוי בעתיד הלוט בערפל של היחסים עם ערב הסעודית, וכך או אחרת התהליך יימשך שנים רבות.

לבסוף, התהליך המתקדם ביותר בתחום הוא מעבר ליבוא תזקיני נפט (בנזין, סולר וחומרים אחרים לשימוש תעשייתי וביתי). מהלך זה מקורו בכלל במניע אחר – השאיפה להוציא את בתי הזיקוק ממפרץ חיפה לצורך פיתוח העיר והמטרופולין, הפחתת זיהום האוויר והסיכון לתושבים. סגירת בז"ן (האחראית כיום לרוב תוצרי הנפט בישראל, לצד בית הזיקוק הקטן יותר באשדוד)

התיכון (שם הכריזה על אזור כלכלי בלעדי לה וללוב, בניגוד לכל המוסכמות: שפניר, 2019), או בים האדום, שם היא מקימה בסיסים צבאיים החולשים על נקודת החנק בחופי סומליה ובסודאן (דקל, 2024). לכך נוסף מתקפה פוטנציאלית על שאר תשתיות האנרגיה, כגון מתקפות סייבר על המערכת או פגיעות "מסתוריות" בקווי הגז התת-ימיים (בדומה לפגיעה הרוסית בצינור הגז נורד סטרים).

אכן, ישראל תרה בקדחתנות אחר יצואניות נפט חדשות, אך לרוב אלו נמצאות במרחק רב. מלבד העלות הגבוהה שריחוק זה משית על הנפט הנסחר, ניסיון העבר מעיד באיזו קלות סחר זה עשוי להיקטע, כמו שאירע עם רוסיה בשל מלחמתה באוקראינה, עם האוטונומיה הכורדית בשל מדיניות עיראקית חדשה, עם מדינות מערב אפריקה שבהן מתרחשות הפיכות חדשות לבקרים (אלמס, 2023), או עם ספקיות במזרח שנאלצות לשוט בנתיב המאמים של הים האדום (דקל, 2024). לבסוף, מכליות רבות נאלצות לעבור שטעון בנמלי הים התיכון הקרובים על מנת להיערך לפריקה בישראל, מה שיוצר מחדש תלות במדינות אחדות – מהפך פוליטי שלילי ביוון או באיטליה, למשל, יעמיד את ישראל בבעיה חמורה. נקודות התורפה אינן נעלמות עם פריקת הדלק בנמלי ישראל, מאחר שתשתיות הפריקה, העיבוד, ההולכה והאספקה של חומרי הגלם עשויות גם הן להיות מותקפות. דוגמאות מהעבר הן פגיעת חמאס במאגרי חברת תשתיות אנרגיה (תש"א) באשקלון ב־2021 (דקל, 2024) והמתקפה האיראנית על מתקני בז"ן בחיפה ביוני 2025, שהשביתה חלק חיוני בפעילות הזיקוק, ונטען כי העמידה את ישראל על סף משבר של אספקת דלק שנמנע בסופו של דבר, ובסיכון שעדיין קיים בנוגע לאספקת גז בישראל. התלות המשקית בשני בתי זיקוק

תלות בגורמים חיצוניים (מלבד באספקת חומרי הגלם להקמת התשתיות) (מדר, 2023). נוסף על כך, הרחבת השימוש באנרגיה מתחדשת תורמת למאבק מהחשובים בדורנו – הפחתת פליטות פחמן וצמצום ואף מניעה של משבר האקלים. תרומה משמעותית למאבק זה תצמצם את האסונות האקלימיים המאיימים על ישראל, מעליית מפלס הים ועד אירועי קיצון של מזג האוויר. כמו כן היא צפויה לחזק את מעמדה של ישראל כמדינה ירוקה וחדשנית, העומדת ביעדי הפליטה שלהם התחייבה בהחלטות ממשלה (ראו: מבקר המדינה, 2020; משרד ראש הממשלה, 2020) ובפורומים גלובליים – נקודה חשובה שישיראל תרוויח לזכותה בזירה הבינלאומית, שם מדובר בסוגיה מרכזית (בכר, 2021).

עם זאת, שלושה חסמים מרכזיים עומדים בפני יכולתנו לקבל החלטה לאומית אסטרטגית בנושא זה ולממש אותה בהקדם: הראשון הוא חסם הקרקע. הפקת אנרגיה מתחדשת בהיקף גדול כרוכה בהקמת מתקנים (בעיקר שדות קולטים) בשטח נרחב. במצב אידיאלי ניתן היה להקים קולטים רבים על גגות ובתאי שטח קטנים בין הערים והיישובים (ראו מרכז השל, 2021), וכן לעשות שימוש דואלי בשטחים חקלאיים (אגרו-וולטאי) (פרידמן, 2021). אך מימושו של חזון זה מחייב תיאום, הסדרה, שיווק, תכנון, רגולציה, ושיתוף פעולה בין אין ספור בעלי קרקע, בעלי גגות, התמודדות עם התנגדויות תכנוניות (למשל, מסיבות סביבתיות או נופיות) ועוד (אלתרמן וטשנר, 2021; הכנסת – מרכז המחקר והמידע, 2021; מבקר המדינה, 2020).

גם המאמץ לקדם ייצור סולארי משולב בחקלאות מתגלה כמורכב ומתאים לגידולים מעטים בלבד, ובכך הפוטנציאל שלו מוגבל. בהחלט יש להמשיך לקדם נתיבים אלו, אך גם נדרש להכיר בעובדה שהם ארוכים, מורכבים ואינם צפויים להוביל את ישראל באופן אסטרטגי בזמנים הנדרשים לעמידה ביעדי 2030 או מעבר לכך, או ליצירת חוסן אנרגטי לאומי מספק, המנתק את תלותה בדלקי מחצבים המיובאים מחוץ לה. הפתרון האידיאלי לחסם זה הוא השימוש המתבקש בקרקעות הנגב הרבות, המהוות 60 אחוזים משטח המדינה, פנויות בחלקן הגדול להקמת תשתיות גדולות וכמובן, הן עתירות בקרינת שמש יותר מהשטחים בצפון הארץ (שם האקלים היס-תיכוני מביא לכיסוי עננים במשך זמן רב יותר לאורך השנה). רשות החשמל (2020) בדקה ומצאה כי באזורי המרכז עתודות הקרקע לייצור סולארי זניחות, וכי 85 אחוזים מהקרקע המתוכננת או בעלת פוטנציאל לתכנון מצויים בנגב.

בהקשר זה מובא החסם השני: מגבלת ההולכה. ייצור בהיקף גדול מחייב הנעת אנרגיה דרך רשת אדירה של

התפוך את המשוואה, וניתן יהיה לייבא את תוצרי הדלק המוגמרים ממגוון רב של מדינות שבהן יש בתי זיקוק פעילים (דוידוביץ' ועמיתיו, 2025). תחזית משרד האנרגיה והתשתיות (2024ב) היא שהמעבר העולמי לאנרגיה מתחדשת יוביל לעודפי ייצור בבתי זיקוק רבים – עיקרם במזרח ומיעוטם באירופה – וכך יש לצפות להיצע מספק וממגוון מקורות אפשריים. מצב זה גם הוא מותיר את ישראל תלויה במדינות אחרות (חורש, 2020) – גם אם ממקורות מגוונים ולכן יציבים יותר – ותלויה גם בביטחון נתיבי התנועה מהן (אם עיקר ההיצע יגיע ממזרח לסואץ מדובר בסיכון, כאמור, מאחר שהתנועה ההכרחית היא דרך נקודות החנק בים האדום). לכן חשוב לקדם את פתרון היבוא, אך אין לראות בו פתרון מלא.

גם המאמץ לקדם ייצור סולארי משולב בחקלאות מתגלה כמורכב ומתאים לגידולים מעטים בלבד, ובכך הפוטנציאל שלו מוגבל.

אומנם ניתן לפעול לעיבוי ההגנה על התשתיות השונות, אולם יש לצפות ואף להיערך בוודאות גבוהה יחסית לכך שבעימות עתידי ייגרמו נזקים גדולים יותר למערכת, בין בשל מתקפה או בשל החלטות פוליטיות של מדינות (וגם באסון טבע, כגון רעידת אדמה). התמקדות בלעדית באמצעי הגנה לא תספיק במקרים אלו וישיראל תיוותר חשופה. הפרדיגמה המובילה להיערכות הנדרשת היא מעבר מהגנה לחוסן (resilience), שמשמעותו להכיר בכך שאסון כלשהו עתיד לקרות, ועל המערכת להיערך להתמודדות עם השלכותיו, גם בנסיבות או בהיקפים בלתי צפויים, להחזיק מבלי לקרוס במהלכו ולהתאושש במהירות. לכן, אסטרטגיה לאומית לחוסן אנרגטי חייבת להתמקד בביזור ובגיוון משק האנרגיה ובתוכו מגזר הנפט; ריבוי "רגליים" יאפשר למערכת משענת מספקת גם כאשר רגל אחת נשברת (אקשטיין ועמיתיו, 2021; גרוסמן ועברון, 2016; וינשטוק ואלרן, 2016; מדר, 2023; פרידמן, 2021; Cohen, 2025).

ההזדמנות והחסמים לביזור ולגיוון המשק באנרגיה מתחדשת

כידוע, ישראל התברכה בקרינת שמש רבה וביכולת לייצר אנרגיה ממקור סולארי. בין יתרונותיהן של תשתיות סולאריות – עמידותן לתקיפה (ניסיון לפגוע בקולטים פוטו-וולטאיים מצריך מאמץ רב ומבטיח הישג נמוך מאוד לתוקף) והאפשרות לביזור גיאוגרפי של מתקני ההפקה. כמובן, אנרגיה מסוג זה מופקת, מעובדת ונצרכת כולה בגבולות ישראל, ולכן אינה יוצרת כמעט

כי למימן תפקיד מרכזי במשק האנרגיה העתידי, הן בשל הכורח למצוא פתרונות לנוכח משבר האקלים המאיים על האנושות, והן בזכות פריצות טכנולוגיות הולכות ומצטברות, המאפשרות להפיק מימן ולהשתמש בו בזירות שונות בעלות הולכת ופוחתת.

בעשור האחרון הולך ומתבהר כי למימן תפקיד מרכזי במשק האנרגיה העתידי, הן בשל הכורח למצוא פתרונות לנוכח משבר האקלים המאיים על האנושות, והן בזכות פריצות טכנולוגיות הולכות ומצטברות, המאפשרות להפיק מימן ולהשתמש בו בזירות שונות בעלות הולכת ופוחתת.

נהוג לחלק את המימן לפי צבעים שונים, המעידים על אופן ההפקה והשפעתו על הסביבה. מימן אפור או חום מופק באמצעות הפרדתו מדלק מחצבים, מה שמייצר דלק מימני אך אינו מועיל כלל לסביבה, מאחר שבתהליך ההפקה משתחרר הפחמן האגור בחומרים אלו. הפוטנציאל והתקווה טמונים במימן כחול או ירוק. האחרון מופק בתהליך פשוט יחסית של אלקטרוליזה, המפריד אותו ממים תוך שימוש באנרגיה מתחדשת, למשל ממקור אנרגיה סולארית. המימן הכחול מופק מדלק מחצבים, אך באמצעים שונים נתפס הפחמן הנותר ואינו מגיע לאטמוספירה, ומשום כך גם הפקה זו נחשבת ידידותית לסביבה (ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, 2023; משרד האנרגיה והתשתיות, 2024א; Sadeq et al., 2024; Le et al., 2023).

המימן גם מציע יעילות גבוהה ביחס לסוללות בהנעת כלי רכב כבדים (משאיות, רכבות, ספינות, מטוסים, אוטובוסים וציוד מכני הנדסי (צמ"ה) – הזקוקים לפרצי אנרגיה חזקים שאותם הסוללות מתקשות לספק; לעומתם, בכלי רכב פרטיים נראה שעליונותן של הסוללות מובטחת), שימוש בתעשיות או אגירה של אנרגיה ברמה מקומית. השימוש באנרגיה המופקת ממתקן סולארי יעיל יותר אם היא מומרת ישירות לחשמל המזין את הרשת, אך זאת בתנאי שאת כולה ניתן להוליך ביעילות לצרכן ברגע ההפקה, ולהשתמש בה ביעילות. כאמור, בעת שיא הקרינה לא ניתן להוליך את כלל האנרגיה המופקת, ולכן אגירתה כמימן מאפשרת את ניצולה מחוץ לזמן השיא, לאורך שעות הלילה או בימים אחרים נטולי קרינה (משרד האנרגיה והתשתיות, 2024ב).

ייתכן שגם משק הסוללות המתרחב יהיה תלוי באגירה מבוססת מימן, למשל בשימוש לטעינה מהירה של רכב חשמלי, או בשל הצורך לאגור אנרגיה במתקני טעינה אזוריים או שכונתיים או ב"אגירה עונתית" – צרכים ששימוש בסוללות ענק אינו יעיל ואינו בטיחותי עבורם.

קווי מתח. אלו תשתיות יקרות במיוחד, שיוצרות מפגעים נופיים, אקולוגיים ובטיחותיים כבדי משקל בשטח, תופסות עתודות קרקע נרחבות שבהן לא ניתן להשתמש (לבד מחקלאות מוגבלת), ומשום כך מגבילות מאוד את היכולת להישען על הפקה נרחבת במרוחק מאזורי הביקוש לאנרגיה (הכנסת – מרכז המחקר והמידע, 2021). פתרון הטמנת תשתיות אלו יעיל אך יקר מאוד, כך שניתן לבצעו במקטעים מיוחדים בלבד. זאת ועוד, בנייה בלתי חוקית בנגב מגבילה מאוד את היכולת להקים תשתיות ביעילות במרחב זה (מבקר המדינה, 2020). מסיבות אלו גופים ירוקים תומכים במרכז תשתיות הפקה לצורך קירובן לאזורי הביקוש, ובכך לחסוך בהקמת תשתיות (ראו: החברה להגנת הטבע ו-Tasc, 2019; מרכז השל, 2021) – אך כאמור, מדובר במרחב עתיר בעלויות ומגבלות טכנולוגיות וסביבתיות, שקשה מאוד לפעול בו בהיקפים גדולים ובמהירות.

לבסוף, החסם השלישי לחוסן אנרגטי אמיתי הוא התלות הרבה של מגזר התחבורה בדלק שמקורו בנפט, שקשה להמירו לשימוש בחשמל המופק במתקנים סולאריים. אומנם השימוש בסוללות בכלי רכב הולך ומתרחב, אך הוא עומד בפני מספר אתגרים בולטים. ראשית, לסוללות אורך חיים מוגבל, ובעתיד נראה יותר ויותר בעיות ביעילות של סוללות מתיישנות, מפגעי בטיחות בגין ובעיות סביבתיות חריפות בהטמנת היקפי ענק של סוללות שסיימו את מחזור חייהן. שנית וחשוב מכך, הסוללות אינן נותנות מענה יעיל לכלי רכב ולכלים כבדים הדורשים פרצי עוצמה גבוהים, בהם משאיות כבדות, רכבות, ציוד הנדסי כבד, מטוסים, אוניות וכן הלאה. גם מספר תעשיות כבדות לא יוכלו להסתמך על שימוש בחשמל במקום בתוצרי נפט (משרד האנרגיה והתשתיות, 2024א, 2025ב).

בנקודה זו מוצע מהלך אסטרטגי לאומי שעשוי להוביל לפתרון של חלק נכבד מהחסמים שצוינו, תוך יצירת מנופי פיתוח, חדשנות ובעיקר חוסן אנרגטי ברמה שלא ניתן להשיגה באמצעים אחרים. המהלך המדובר הוא מיצוי עתודת האנרגיה הירוקה שנטען לשאוב מן הנגב ואגירתה כמימן, מה שיאפשר הסטת חלק ניכר ממשק האנרגיה הלאומי לשימוש בדלק נקי זה.

ההזדמנות הטמונה במימן

מימן (H_2) הוא היסוד הקל ביותר, ובמצבו הטבעי ניתן לשרוף אותו (לא לבקע – זהו תהליך שונה) ולהפיק אנרגיה רבה מבלי לפלוט פחמן או גזי חממה אחרים. הוא אומנם נפוץ בטבע אך קשה מאוד להפיק, לשנע ולאגור אותו, ועל כן עד לאחרונה לא התייחסו אליו כאל משאב אנרגיה משמעותי. בעשור האחרון הולך ומתבהר

(תרחיש מינימום), אלא אם ישתנו התנאים הטכנולוגיים וניתן יהיה להרחיבו (תרחיש מקסימום), בפרט בשל התאמה נמוכה של המשק ליתרונות המימן – בישראל מיעוט תעשיות כבדות, ותשתיות התחבורה אינן נרחבות (בניגוד למדינות מתועשות גדולות כמו סין, ארצות הברית או מדינות האיחוד האירופי).

‘עמק המימן’ בנגב

בניגוד לבאר נפט או גז, שבה נמצא המשאב מתחת לפני הקרקע, וכל שנדרש הוא להקים תשתית לשאיבתו, הפקת המימן מורכבת יותר. בכל זאת, בהינתן התשתיות הנדרשות ניתן לומר כדימוי כי בנגב קיימת “באר” של דלק מימני ירוק – מעין “מאגר לווייתן” במדבר (בהשאלה ממאגר הגז הגדול לווייתן במזרח הים התיכון). אומנם ניתן להפיק את המימן ממקורות רבים, אך רק הנגב מציע פוטנציאל להקמת מכלול תשתיות גדול דיו.

פרק זה מציע מתווה אסטרטגי המצביע על אפשרויות והזדמנויות לפיתוח מסוג זה, מתוך הכרה שלכל היבט בו נדרש מחקר עומק נוסף לשם בחינת ההיתכנות וההשלכות, לצד תכנון מפורט של היישום. המתווה מגדיר את גישת הפיתוח האזורית המיטבית, מצביע על הפוטנציאל הקרקעי (בתוכניות קיימות ובשטחים שטרם תוכננו או נבחנו), על היישומים האפשריים למימן (חלקם נבחנו לעומק בידי גופי ממשל וחלקם עדיין לא), ומביא מקצת מן ההזדמנויות הטכנולוגיות החדשניות העולות כיום, מתוך הבנה שרבות נוספות יופיעו ככל שיתבסס המיזם הלאומי. החיבור הרעיוני בין מכלול האפשרויות מחד גיסא לבין הצורך הדוחק מאידך גיסא (הנובע מהאיום הגיאופוליטי שלא נבחן היטב בידי גופי המדינה, כמו גם ההזדמנות הייחודית לפיתוח אזורי בפריפריה), הוא שמוביל למסקנה האסטרטגית בנוגע לחשיבות בחירת תרחיש המקסימום למימן והתמקדות בעמק המימן בנגב.

‘עמק מימן’ הוא מודל הפיתוח המקובל בעולם, המתאר מערך בקנה מידה אזורי המחבר בין תשתיות הפקה, שינוע והנפקה וצרכנים, ומחקר ופיתוח המלווה את כל חלקי השרשרת. ההבנה היא שהקושי היחסי בהובלת המימן על פני מרחקים גדולים מחייב את ריכוז המארג באזור נתון על מנת ליהנות באופן מרבי ממשק סגור למחצה. מהלכים להקמת עמקי מימן כבר החלו בישראל באופן ראשוני, באילת-אילות ובדימונה והנגב המזרחי (דקל, 2022), אך כל אלו עדיין תלויים בהכרח בגיבוי ניכר של המדינה ובתמיכה תקציבית בהנחת התשתיות הראשונות. במבט רחב על כלל הנגב ניתן לראותו כאזור אחד המחולק למספר “עמקים” שלובים

לסיכום, המימן – בין בפני עצמו או כחלק משרשרת אספקה ארוכה בתוך ענפי האנרגיה השונים – הוא מרכיב מרכזי שעשוי גם לספק יעילות אנרגטית כלכלית וגם יעילות בטיפול במשבר האקלים. הוא לא בא במקום השימוש בגז או באנרגיה סולארית לרשת החשמל, אלא כמרכיב משלים – בתוך שרשרת אספקת האנרגיה או כפתרון לנקודות בתוכה שאין להן מענה של גז או חשמל.

‘עמק מימן’ הוא מודל הפיתוח המקובל בעולם, המתאר מערך בקנה מידה אזורי המחבר בין תשתיות הפקה, שינוע והנפקה וצרכנים, ומחקר ופיתוח המלווה את כל חלקי השרשרת.

הסבתם של מגזרים שונים במשק למימן אינה פשוטה או זולה, אך האמצעים לכך קיימים כבר כעת, והכלכלה הגלובלית מתקדמת בצעדים נחוצים ליעד זה – ביפן, באוסטרליה, בגרמניה ועוד. גם באזורנו, ערב הסעודית מקימה תשתיות ענק להפקת מימן ירוק בפרויקט ניאום. היקפם הכספי של פרויקטי תשתית מימן בעולם גדל פי שמונה מאז 2021, וכעת הם מוערכים בכ-680 מיליארד דולר (Hydrogen Council, 2024). מהפכה זו מציעה הזדמנויות אדירות של פיתוח טכנולוגיה והקמת תשתיות שיובילו לצמיחה נרחבת. האתגר המרכזי העומד כיום בפני מהלך זה הוא עלות המימן הירוק, הגבוהה מעלות תוצרי הנפט. עם זאת המגמה הטכנולוגית המובהקת היא של הוזלת העלויות, הן בזכות פיתוחים טכנולוגיים מתמידים בתחום והן בשל הנחת תשתיות ראשונות ופיתוח שווקים, מה שמאפשר למנגנון השוק בענף לצמוח ולהוזיל עלויות בהתאם (ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, 2023; משרד האנרגיה והתשתיות, 2024א; ראו גם: Mallapragada et al., 2020). ראוי לציין בעניין זה כי זירת החדשנות במימן של חברות ישראליות הולכת ומתפתחת בשנים האחרונות, עם דוגמאות כגון החברות H2PRO, ג'נסל, אלקטריק גלובל, קלריטר ועוד. משרד האנרגיה והתשתיות (2024א) בחן לאחרונה את הסוגיה וגייש אסטרטגיית מימן לאומית, שעיקריה הם: (1) היערכות לפיתוח שוק המימן כבר עכשיו, לצורך השתלבות במגמה העולמית וגם כחלק ממארג מימן אזורי עתידי במזרח התיכון; (2) השקעה במחקר ופיתוח בנושא המימן, למינוף יכולת החדשנות הישראלית לפריצות דרך בתחום; (3) התקדמות זהירה, מאחר שהטמעה נרחבת של שימוש במימן תלויה במרכיבים שונים, חלקם כרוכים בשימוש בטכנולוגיות חזויות בלבד (שטרם פותחו), ומכאן שעתיד המימן עדיין לוט בערפל; (4) בהתאם לכך היערכות לשימוש מצומצם במימן

שלישית ואולי החשוב ביותר, כפי שהוסבר, קיימת מגבלת הולכת אנרגיה לאזורי הביקוש במרכז הארץ. רק לאחרונה הושלם קו 400 ק"ו המחבר את דימונה למרכז, וגם הוא אינו צפוי לעמוד בעומסי האנרגיה בשעות השיא, ודאי לא אחרי הקמת מרבית הפרויקטים. תוכנית מתאר ארצית 41, הממתינה לאישור הממשלה ועוסקת בפריסת תשתיות האנרגיה, מתבססת על יעדי פליטה לאומיים נמוכים ולא מעודכנים, אינה מעודכנת בנושא הפריצות הטכנולוגיות של השנים האחרונות וגם אינה מתייחסת לחשיבות החוסן האנרגטי נוכח איומים גיאופוליטיים נוכחיים. בהתאם, התוכנית אינה מסדירה היטב את רשת ההולכה הנדרשת. אזור הנגב, בפועל ובתכנון, אינו זוכה להגדרת שטחי הפקה מספקים או לרשת מספקת (בתוכניות הנוכחיות ובתמ"א המופקדת ללא אישור מאז 2021), והדבר משליך על דחיית חלק ניכר מן הבקשות היזמיות לחיבור מתקנים סולאריים לרשת בנגב, בשל מגבלת הרשת (הרבה מעל כל האזורים האחרים) (הכנסת – מרכז המחקר והמידע, 2021).

טכנולוגיות חדשות שפיתחו חברות ישראליות יאפשרו לייצר עוד מימן ממקורות חדשים. למשל, טכנולוגיה המאפשרת התכה של פסולת עירונית מעורבת והמרתה למימן ירוק מחד גיסא ולחומר קשיח מאידך גיסא, שניתן להשתמש בו כמצע לתשתיות.

בנקודה זו נכנסת האגירה כמימן של עודפי האנרגיה שלא ניתן להוליכם ישירות, באמצעות אלקטרוליזה של מים (או בשיטות חדשות להפקה ישירה מהמים). לשם כך תידרש המדינה להקים מוביל מים גדול, הכולל מתקן התפלה חדש באזור השפלה הדרומית, שיוביל אל סדרת מאגרים גדולים בנגב המזרחי. מוביל זה – שעלות הקמתו ותפעולו, כולל האנרגיה הדרושה לשאיבה, תוחזר מתוך הפקת האנרגיה – יאפשר הפקת מימן מן המים, ולצד זאת גם חמצן (לשימושים תעשייתיים שונים), הרחבה ניכרת של החקלאות במרחב הנגב המזרחי, שדרוג הפארקים והגינות העירוני עבור מאות אלפי תושבים והקמת מיזמים תיירותיים גדולים סביב נאות מדבר שיורחבו, בהם אגמי ירוחם, דימונה, פארק גולדה ונחל באר שבע.⁴

טכנולוגיות חדשות שפיתחו חברות ישראליות יאפשרו לייצר עוד מימן ממקורות חדשים. למשל, טכנולוגיה המאפשרת התכה של פסולת עירונית מעורבת והמרתה למימן ירוק מחד גיסא ולחומר קשיח מאידך גיסא, שניתן להשתמש בו כמצע לתשתיות. הקמת מתקנים מסוג זה בערי הנגב ובמטמנות האשפה הארציות הקיימות

זה בזה – אילת, דימונה ורמת נגב – ומכאן שפירוט הפוטנציאל יתייחס לכולם כאל מכלול אזורי אחד. בנגב, שהוא האזור עתיר הקרינה ועתיר הקרקע ביותר בישראל, קיימים כבר כיום מספר מתקנים גדולים להפקת אנרגיה מתחדשת, בראשם מתקן אשלים התרמו־סולארי. שדות גדולים הרבה יותר מתוכננים וצפויים לקום בשנים הקרובות (ראו: מנהל התכנון, 2021; משרד האנרגיה והתשתיות, 2025א): הרחבת אשלים, דימונה דרום, הרחבת צאלים, תמנע ועוד באזור הערבה, חתרורים, חצרים ועוד (סך הכול כ־20 אלף דונם). שני פרויקטי ענק נוספים עם תכנון ראשוני: 'סדום הירוקה' בשטחי מפעליים המלח ושדה אורן־צין, המצוי בתהליכי תכנון סטטוטורי. הוא ישתרע על שטח של עד 110 אלף דונם וצפוי להפיק עשרות אלפי מגה־ואט/שעה של אנרגיה סולארית – אחד מן השדות הגדולים בעולם. יש לצפות ששדות קטנים ובינוניים נוספים רבים שהוקמו או יוקמו במרחבי הנגב יפיקו יחד עוד מאות אלפי מגה־ואט/שעה – בשטחי משבצת של יישובים ובערים, בשטחים שיוסדרו במרחב היישובים הבדואיים, במישורים העוטפים את נאות חובב וקמ"ג, ובייחוד במתקנים ביטחוניים ובשטחי האש הנרחבים, שבהם קיים פוטנציאל רב של עשרות אלפי דונמים (רשות החשמל, 2020). לכך נוסיף גם שדות שניתן להקים בשטחי דרום ירדן ובעיקר במרכז סיני הקרובים לגבול, בהשקעה משותפת, שימכרו אנרגיה לצד הישראלי. בחזון אופטימי אף יותר ניתן לכלול יבוא מימן ממתקני ניאום – מרכז המימן הסעודי הענק המוקם כעת.

בין הנסיבות המונעות או מעכבות את החזון הזה – ראשית, מגבלת ההון הזמין להקמה. סוגיה זו עשויה להיפתר אם המדינה תגדיר את הדבר בעדיפות לאומית ותחליט לתמוך כספית (במענק ישיר ליזמים או בעלויות הקרקע והפיתוח למשל), כמו גם ביעול וזירוז תהליכי התכנון והרישוי. שנית, התנגדויות מצד גופים ירוקים הרואים בחלק מן השדות מפגע נופי ואקולוגי, בעיקר בעומק המדבר, הנתפס בעיניהם כמרחב רוגע ושלווה וכארץ בראשית שיש לשמרה כפי שהיא ככל האפשר (החברה להגנת הטבע ו־Tasc, 2019). אין לזלזל בטענות אלו, אך בהחלט ניתן לטעון בתוקף (ולהנחות את ועדות התכנון בהתאם) שהנגב נרחב דיו – 60 אחוזים משטח המדינה – שטח שלא יספיק לכלכל את כל צורכי משק האנרגיה מכיוון שהוא משופץ שטחי אש, שמורות טבע ושימושי קרקע אחרים, אך בכל זאת מספיק על מנת להקים בו, בזיהירות ובאיזונים הנדרשים, מספר מתקנים המשרתים גם את האינטרס הלאומי וגם את הסוגיה הסביבתית בהקשר האקלימי.³

הנגב המזרחי, שיתבססו על מימן וייצרו איפוס פחמני עירוני עבור יותר מחצי מיליון תושבים. במערכת העירונית המימן יומר במתקנים מקומיים לחשמל למגורים, לתעשייה וגם לטעינת כלי רכב חשמליים פרטיים, או להנעת אוטובוסים במימן. שימוש דומה ייעשה בבסיסי צה"ל ובמתקנים ביטחוניים נוספים, שינותקו בפועל מרשת החשמל לטובת עצמאות אנרגטית מקומית. במקביל, קו הרכבת המתוכנן בין באר שבע לאילת יופעל על בסיס קטר מונע במימן, וכך גם מתקנים גדולים אחרים, בהם שדה התעופה רמון ועוד.

התעשיות הגדולות המצויות בנגב יעברו המרה מרבית לשימוש במימן לתהליכי הייצור – מפעלי ים המלח, קמ"ג ועוד. בעידוד המדינה יעתיקו תעשיות גדולות אחרות את מקומן מן המרכז לנגב המזרחי, שם ייהנו ממינוף ערך הקרקע במרכז, מאנרגיה ירוקה מסובסדת בנגב ומהפריווילגיה למכור את מוצריהן בחו"ל כמוצרים נקיים מעקבת רגל פחמנית, ועל כן יהיו פטורים ממכסים סביבתיים (הצפויים להאמיר בשנים הקרובות). מפעל חשוב שיש לבחון הוא מפעל מלט ירוק דרומי. המפעלים הנוכחיים הם מהמהמים ביותר ומהאחרים הכבדים לפליטת פחמן, בשל פעולת התנורים העצומים הנדרשים להפקת חומרי המלט. ההכרח לפעול להקמת מפעל נוסף בנגב כבר זוהה בוועדת הרשקוביץ (הוועדה הבין משרדית לקידום התחרות בענף המלט, 2013), כחלק מהפחתת עלויות הבנייה ויצירת חוסן בענף, כדי להימנע מתלות ביבוא מלט מחו"ל. באר המימן בנגב פותחת את ההזדמנות לייצר מלט ירוק מבוסס מימן וחוסן נוסף בענף הבנייה (ראו: ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, 2023; Bacatelo et al., 2024).

מפעלים נוספים שימצאו יתרון רב בנגישות למימן הירוק והכחול וגם יניעו אדוות פיתוח אזוריות רחבות יהיו יצרני אמוניה ירוקה (שניתן לשנעה במכליות מנמל אשדוד לנמלי אירופה, ושם להמירה מחדש למימן ירוק) וגם דלק סילוני נקי דלק סינטטי לתעופה (ראו: משרד האנרגיה והתשתיות, 2024). פיתוחים ישראלים חדשים קיימים יידעו להפיק מימן אגור כאבקה יבשה – מוצר המאפשר אחסון יעיל ובטוח של אנרגיה להנעת מנועים באתרים שונים שאינם מחוברים לרשת (למשל באתרי בנייה, במחנות צבא או באתרים מבודדים אחרים).

צרכן ענק נוסף של אנרגיה, שגידולו העתידי צפוי להיות מעריכי, הוא חוות השרתים, הנדרשות לתמיכה בשוק העצום של בינה מלאכותית, בשוק הקריפטו ובכל מארג האינטרנט הבין-יבשתי. לצורך קירור צורכות חוות השרתים הגדולות כמויות עתק של אנרגיה, וברחבי העולם הן נדרשות להוכיח כי הן נלחמות לצמצום פליטת

בו (אפעה ודודאים) תאפשר הפקת אלפי טונות של מימן בשנה (הערכה של יותר מ-2,000 טונות לעיר קטנה), לצד טיפול נקי, סביבתי וכלכלי בפסולת במקום הטמנתה. טכנולוגיה חדשה נוספת תאפשר הפקת מימן מגז טבעי, תוך תפיסת הפחמן הנותר והצמדתו הכימית לפוספוגבס, לצורך ייצור אבן גיר. בכך יהפוך הגז המזהם למימן כחול (מוערך בכ-100 אלף טונות לשנה), במתקן שיוקם בסמיכות למאגרי הפוספוגבס של מפעלי ים המלח בנגב המזרחי.

אומדן גס מראה כי חיבור המימן הירוק שיופק מהמתקנים הסולאריים (לצורך הערכה, לאחר שיוקמו בשטח של 200 אלף דונם ניתן יהיה להשתמש במחצית מהם להפקת 300 אלף טונות מימן בשנה) עם המימן מפסולת והמימן הכחול שיופק מגז טבעי (עוד כ-100 אלף טונות בשנה) יביא לסך של קרוב לחצי מיליון טונות בשנה בנגב (אין הכוונה כאן לבצע הערכה מדויקת, אלא אומדן בלבד להיקף שניתן להשיג על בסיס הגדרת יעד לאומי). אם לא תיבחר גישת "או או" (או מתקנים סולאריים גדולים בנגב או ריבוי מתקנים קטנים במרכז) אלא גישת "גם וגם", ניתן יהיה להפנות את מרבית פוטנציאל תשתיות הנגב להפקת מימן, בעוד ששאר המתקנים יזינו ישירות את רשת החשמל הארצית. למה תשמש כמות גדולה כזו של מימן? על פי משרד האנרגיה (2024א), בתרחיש מקסימלי ניתן יהיה להשתמש בכמיליון טונות לשנה כדי להניע 40 אחוזים מכלי הרכב הכבדים (משאיות כבדות ואוטובוסים), לספק כרבע מצריכת האנרגיה בתעשייה (ב-15 מפעלים גדולים) ומרבית שוק התעופה והספנות (בדלקים סינתטיים לתעופה SAF). בנתון זה, אם יושג כיעד לאומי, ניתן להשיג גיוון אמיתי ומהותי במגזרים מורכבים אלו.⁵

ממשלת ישראל זיהתה לאחרונה את הפוטנציאל הטמון בחזון זה והקצתה בהחלטת ממשלה 20 מיליון ש"ח ראשוניים להקמת עמק מימן, כמכלול אזורי שבו שותפות רשויות מקומיות (בראשן דימונה ולצידה רשויות נוספות בנגב המזרחי). הנעת מכלול המימן בנגב תתחיל בתמיכה בפיילוטים שיאפשרו ניסוי ושיפור הדרגתי, בחינת יעילות הטכנולוגיות הזמינות ושימותן, תוך סיוע בהתמודדות עם הסיכון הכרוך בהשקעה יזמית בחזית חדשה זו. תחילה תוקם רשת תחנות תדלוק מימניות בציר אילת-באר שבע-חיפה, ובהמשך תהיה החלפה הדרגתית של ציי הרכב הכבד וכלי הצמ"ה בכל המרחב לכאלו המונעים במימן (רצוי והכרחי, בתחילת הדרך, בתמיכה של המדינה בדמות סובסידיה לרכישת הכלים ולהקמת התחנות, כי בלעדיה לא ניתן יהיה להקים את התשתית הנדרשת לפעילות שוק בענף החדש). הצעד הבא יהיה הקמת מיקרו-גרידים עירוניים נרחבים בערי

החשובה הזו ויחזק את מיקומה במערך המימן האזורי הצומח עם שכנותיה.

תפיסה אסטרטגית זו מרחיבה את המבט הרווח בנוגע לאופי האיומים, לדחיפות בטיפול בהם וכיצד יש לשקול אותם בתוך הדיון הטכני-כלכלי על ההשקעה הרצויה בסוגיית המימן. תפיסה זו גורסת כי בדיון על עתיד משק האנרגיה עלינו להעריך אילו חידושים סביר להניח שיופיעו, אך לצד זאת לשקול גם כיצד נוכל להביאם באופן אקטיבי. בכך התפיסה האסטרטגית גם מניחה גישה ישראלית ברוחה של אמונה בחדשנות, שמזהה את האפשרות ופועלת לממשה, גם אם אופן הביצוע טרם נבחן והטכנולוגיה הנדרשת טרם הבשילה במלואה. עולה מתוכה הקריאה לראות ב"תרחיש המקסימום" שהגדיר לאחרונה משרד האנרגיה "מינימום הכרחי" להשגת חוסן לאומי מספק; וגם קריאה להשתמש בעמק המימן כמנוע צמיחה אזורי אדיר לנגב ולמשק כולו.

ד"ר תומר דקל הוא מתכנן וגיאוגרף, מנהל את מחלקת האסטרטגיה בחברת בילד (Build). עוסק בתכנון אסטרטגי ובמחקר בתחומי פיתוח עירוני, אזורי ומטרופוליני, קלאסטרים תעסוקתיים, ההתיישבות הבדואית בנגב, גיאוגרפיה צבאית וגיאופוליטיקה של תשתיות. tomerdkl@gmail.com

המאמר נכתב בשיתוף עם מעבדת גוטסמן לעתיד ישראל, תנועת אור (במסגרת תנועת אור ליווה הכותב את עיריית דימונה בבחינה אסטרטגית של תחום המימן כמנוע צמיחה לעיר).

מקורות

איגוד הגז הטבעי ו-BDO (2024). **דו"ח משק הגז הטבעי בישראל 2024 - ביטחון אנרגטי בישראל 2024**.

<https://tinyurl.com/y8dkswtw>

אלמס, ד"ש (2023, 2 באוקטובר). אחרי ההפיכה בגבון: מה יהיו מקורות הנפט הבאים של ישראל, **גלובס**.

<https://tinyurl.com/2wh4ynx6>

אלמס, ד"ש (2024, 5 במאי). **יצוא הנפט לישראל דרך טורקיה נמשך למרות החרם. אלו הסיבות**. וואלה.

<https://tinyurl.com/57jh6pv9>

אלתרמן, ר' וטשנר, נ' (2021). **אנרגיה מתחדשת מקורקעת: החסמים של רגולציה קרקעית ותיכנונית בישראל במבט השוואתי**. הטכניון. המרכז לחקר העיר והאזור.

<https://tinyurl.com/5cfahme9>

אקשטיין, צ', סומקין, ס', ואקסלרד, ה' (2021). **אסטרטגיה לתכנון אופטימלי של משק החשמל**. נייר מדיניות 2021.03, מכון אהרון

למדיניות כלכלית. <https://tinyurl.com/2y22myvt>

בכר, ג' (2021). ישראל זירת שינויי האקלים הבינלאומית - עניין של ביטחון לאומי. בתוך ק' מיכאל, א' טל, ג' לינדנשטראוס, ש' בוקצ'ין

פלס, ד' חנין ו' וייס (עורכים). **סביבה, אקלים וביטחון לאומי: חזית חדשה לישראל** (עמ' 67-77). מזכר 209, המכון למחקרי

ביטחון לאומי. <https://tinyurl.com/4vst9myx>

בכר, מ' (2024). לגוון את מקורות הנפט של ישראל, **השילוח**, 39.

<https://tinyurl.com/rd3ucez6>

הפחמן שלהן. בתמיכת המדינה ובעידודה ניתן יהיה למנף את מאגר המימן בנגב לטובת הקמת מערך ענק של חוות שרתים בבאר שבע, שיהפוך עוגן לצמיחת עתק של חברות טכנולוגיה הנשענות על קרבה לחוות אלו לצורך שימוש בכוח מחשוב גבוה.

לבסוף, הקמת מרכז מחקר ופיתוח לאומי לחקר האנרגיה והאגירה בלב הנגב תקים את "מרכז העצבים" של עמק המימן כולו (כפי שהציעו, למשל, תנועת אור - מעבדת גוטסמן לעתיד ישראל ועיריית דימונה: דקל, 2022). כך ניתן יהיה לפתח מרכז (האב) תשתיות המחבר הפקה, הובלה, צריכה ומחקר במעין "מעבדה חיה" ענקית, המשפרת את היכולות ומייצרת את חזית הידע לעולם הצמא לחדשנות הישראלית, גם ובייחוד נוכח משבר האקלים.

סיכום

האיומים הגיאופוליטיים על ישראל גוברים בהתמדה, פושטים ולובשים צורות חדשות, ובתוכם שמור מקום מיוחד לאיום על משק האנרגיה. המגמה הנוכחית מצביעה על איום גובר מצד טורקיה, גם אם רק בטווח הארוך. שליטת הטורקים, שהיחסים עימם מחמירים בצורה עקבית, על נתיבי סחר הנפט המרכזיים עם ישראל היא נקודת תורפה קריטית - בין בצינורות החולפים דרכה, בבסיס צבא חיצוניים לאורך ים סוף או ביכולת לתקוף ישירות או באמצעות שלוחים (בגלוי או בחשאי) את תשתיות הנפט, וגם מרכיבים אחרים ברשת האנרגיה בתוך גבולות ישראל. בניית חוסן למשק האנרגיה מפני איום זה ודומים לו תלויה בביזור ובגיוון מקורות האנרגיה מעבר לתלות הגבוהה בגז הטבעי. ואולם המעבר הנדרש לאנרגיה מתחדשת רווי חסמים פיזיים, כלכליים ורגולטוריים, וממילא אינו מאפשר פתרון מספק לענפי התחבורה והתעשייה הכבדה, שתלותם בנפט גבוהה ותישאר כך זמן רב.

המענה המערכתי שהוצע כאן, גם אם אינו מלא, הוא לראות בהפקת המימן מרכיב מרכזי בבניית חוסן זה: הפיכת הנגב לאסם האנרגיה של ישראל, ובליבו מערך הפקה ושימוש במימן המיוצר מאנרגיה מתחדשת ומים - מימן ירוק; או מגז טבעי ומפסולת, תוך ספיגת הפחמן ומניעת פליטתו לאוויר - מימן כחול. עמק המימן בנגב יאפשר הפקת דלק ירוק ונקי מפחמן עבור חלקים כבדי משקל במגזר המשאיות הכבדות, האוטובוסים, הרכבות, הספנות, התעופה והתעשיות הכבדות. מערך כזה ייצוק חוסן למערכת במקרה של זעזוע - בעקבות מתקפה על תשתית, אמברגו, מצור או אף אסון טבע - וגם יציעד את ישראל להפיכתה למובילה עולמית של מאבק במשבר האקלים, יבסס אותה בחזית הטכנולוגית

משרד האנרגיה והתשתיות (2024, פברואר). **אסטרטגיית מימן: עקרונות מנחים וצמתי הכרעה**. <https://tinyurl.com/yxtzkzhy>
 משרד האנרגיה והתשתיות (2024, ב, 16 ביוני). **עתיד משק הדלק הישראלי – עבודה אסטרטגית**. <https://tinyurl.com/3chnd3dx>
 משרד האנרגיה והתשתיות (2024, ג, 11 ביולי). **מסמך מדיניות דלקי תעופה בני קיימא**. <https://tinyurl.com/3mww7y58>
 משרד האנרגיה והתשתיות (2025, א, ינואר). **מסמך עדכון ל"מפת הדרכים לאנרגיות מתחדשות בשנת 2030"**. <https://tinyurl.com/2jmyrard>
 משרד האנרגיה והתשתיות (2025, ב, 9 באפריל). **הוועדה הבין-משרדית לבחינת מדיניות משק הגז הטבעי וחיוזק הביטחון האנרגטי – פרסום טיוטת דוח להתייחסות הציבור**. <https://tinyurl.com/3s5bhpuxu>
 משרד ראש הממשלה (2020, 25 באוקטובר). **קידום אנרגיה מתחדשת במשק החשמל ותיקון החלטות ממשלה** + החלטה מספר 465 של הממשלה. <https://tinyurl.com/mr3477z3>
 פלדמן, ג' (2024, 2 בינואר). **מלכודת הנפט של ישראל: האם ארדואן יפסיק את הזרם?** TheMarker. <https://tinyurl.com/2hjx8hzc>
 פרידמן, ג' (2021). **אנרגיה מתחדשת – המפתח לחוסן לאומי באנרגיה**. בתוך ק' מיכאל, א' טל, ג' לינדנשטראוס, ש' בוקצ'ין פלס, ד' חנין וו' יויס (עורכים). **סביבה, אקלים וביטחון לאומי: חזית חדשה לישראל** (עמ' 199-211). מזכר 209, המכון למחקרי ביטחון לאומי. <https://tinyurl.com/4vst9myx>
 רשות החשמל (2020, 10 באוגוסט). **הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030**. <https://tinyurl.com/2s38whw8>
 שמיל, ד' ושרף, א' (2025, 3 ביוני). **לפי הנתונים הרשמיים – אזרבייג'אן הפסיקה את יצוא הנפט לישראל. האמת קצת אחרת**. TheMarker. <https://tinyurl.com/dam86f36>
 שפיניר, ב' וחורב, ש' (2019, 23 דצמבר). **כך עלולה טורקיה לחסום לישראל את הים התיכון**. Ynet. <https://tinyurl.com/r95x83nu>

Bacatelo, M., Capucha, F., Ferrão, P., Margarido, F., & Bordado, J. (2024). Carbon-neutral cement: The role of green hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 63, 382-395. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.028>
 Cevic, S. (2025, October 2). *Beyond Gaza: The strategic fault lines in Turkey-Israel relations*. Arab Center Washington DC. <https://tinyurl.com/3x5885f2>
 Cohen, E. (2025). Structural vulnerabilities and resilience of Israel's energy sector during security emergencies. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 20(1), 2559944. <https://doi.org/10.1080/15567249.2025.2559944>
 Epstein, J. (2025, June 25). *Turkey and Israel – cooperation through gritted teeth*. (Turkeyscope, 9(3)). Moshe Dayan Center for Middle Eastern and African Studies, Tel Aviv University. <https://tinyurl.com/3rsy38au>
 Hydrogen Council & McKinsey & Company (2024). *Hydrogen Insights 2024*. <https://tinyurl.com/mtk9fzfe>
 Le, P.A., Trung, V.D., Nguyen, P.L., Phung, T.V.B., Natsuki, J., & Natsuki, T. (2023). The current status of hydrogen energy: an overview. *RSC advances*, 13(40), 28262-28287. <https://doi.org/10.1039/D3RA05158G>
 Mallapragada, D.S., Gençer, E., Insinger, P., Keith, D.W., & O'Sullivan, F.M. (2020). Can industrial-scale solar hydrogen supplied from commodity technologies be cost competitive by 2030?

בנימין, ע' (2025, 15 בספטמבר). **החורף מתקרר, והגז המשמש לבישול וחומום עשוי לא להספיק למשקי הבית**. TheMarker. <https://tinyurl.com/3jre79wd>
 גרוסמן, ג' ועברון, י' (עורכים) (2016). **סביבה ואנרגיה: בטחון באספקת אנרגיה בישראל – סיכום והמלצות דיון פורום אנרגיה 37**. מוסד שמואל נאמן. <https://tinyurl.com/4fu5mets>
 דוידוביץ, ג', רובין, א', אולוס, ט' וניימן, ג' (2025). **נייר עמדה – האצת מעבר ישראל לאנרגיה חלופית בעקבות הפגיעה בבו"ן: צעדי מדיניות למימוש חזון חדש למשק האנרגיה**. המכון הלאומי למדיניות אקלים וסביבה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב. <https://tinyurl.com/yenzryh4>
 דקל, ת' (2022). **פיתוח מנועי צמיחה בענפי האנרגיה והרובוטיקה בדימונה**. עיריית דימונה ותנועת אור.
 דקל, ת' (2024). **חמאס והמשחק הגדול החדש, עדכן אסטרטגי**, <https://tinyurl.com/ax2h9ym4>. 15-3, (1)27
 דקל, ת' (2024). **נקודת חנק: תחרות התשתיות בין המעצמות בים סוף**. <https://tinyurl.com/mr3w8ck5>. 17-3, (4)27
עדכן אסטרטגי, <https://tinyurl.com/mr3w8ck5>. 17-3, (4)27
 הוועדה הבין-משרדית לקידום התחרות בענף המלט. (2013). **שינויים מבניים והגברת התחרות בענף המלט: ממצאים והמלצות**. <https://tinyurl.com/mumjbx5u>
 החברה להגנת הטבע, ו-Tasc30 (2023). **גיבוש אסטרטגיה לרשת חשמל ירוקה בישראל**. <https://tinyurl.com/cjn7ukje>
 הכנסת – מרכז המחקר והמידע (2021, 7 בדצמבר). **אנרגיה מתחדשת בישראל – רקע וסוגיות לדיון – עדכון**. <https://tinyurl.com/2rb4au7p>
 וינשטוק, ד' ואלרן, מ' (2016). **ביטחון מערכת החשמל בישראל: הצעה לאסטרטגיה רבתי**. מזכר 152, המכון למחקרי ביטחון לאומי. <https://tinyurl.com/buazcym2>
 ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים להתמודדות עם משבר האקלים (2023). **נייר עמדה מס' 3: דלק מימן**. <https://tinyurl.com/4aytccv4>
 חורש, ה' (2020, 16 ביוני). **הדו"ח המושחר של מקינזי: "פינוי מפעלי מפרץ חיפה יעלה 18 מיליארד שקל – זה יקר מדי"**. TheMarker. <https://tinyurl.com/3n4jn6bm>
 כהן ינרוב'ק, ח"א (2025, 31 במאי). **הסרה הטורקי: אתגר אסטרטגי חדש עבור ישראל**. המכון ליחסי ישראל-אפריקה. <https://tinyurl.com/2p8ym2wb>
 כהן ינרוב'ק, ח"א (2025, 7 ביולי). **החלה המלחמה הקרה בין ישראל לבין טורקיה**. המרכז לאסטרטגיה רבתי לישראל. <https://tinyurl.com/muhjir86>
 לזימי, ג' (2025, 10 באוקטובר). **המבחן הטורקי: ממה ישראל צריכה להיזהר בהסכם טראמפ? וואלה**. <https://tinyurl.com/yc4sk2wj>
 לינדנשטראוס, ג' ודניאל, ר' (2024). **יחסי טורקיה-ישראל בנקודת מפנה מסוכנת**. מבט על, גיליון 1853, המכון למחקרי ביטחון לאומי. <https://tinyurl.com/yc48wjxr>
 מבקר המדינה (2020). **דוח שנתי 71א: קידום אנרגיות מתחדשות והפחתת התלות בדלקים**. <https://tinyurl.com/2jcw25x4>
 מדר, ד' (2023). **חוסן אנרגטי בישראל – רשת חשמל ריכוזית אל מול רשת חשמל מבוזרת: סקירת סיכונים**. SP Interface. <https://tinyurl.com/mryj78jv>
 מוסטקי, ע"א (2025, 15 ביולי). **בתי הזיקוק מתריעים מפני מחסור חמור בסולר, משרד האנרגיה מתקש שאין בעיה. כלכליסט**. <https://tinyurl.com/42b2t2c7>
 מנהל התכנון (2021, 22 בנובמבר). **תמא 41 – תכנית מתאר ארצית לתשתיות אנרגיה**. <https://tinyurl.com/37tsppttr>
 מרכז השל (2021). **NZO: 95% עד 2050 חשמל ממקורות מתחדשים בישראל**. <https://tinyurl.com/ym4av34v>

על בסיס אגרז'ולטאי ובשדות שבמשבצות יישובים). פוטנציאל קרקע שטרם נבחן באופן מספק מצוי בשטחים "כלואים" באזורי תעשייה גדולים (דוגמת מישור רותם), אזורי כרייה לא מנוצלים, שטחי אש במתחמים שבהם אין פעילות סותרת, שולי מתקנים ביטחוניים כגון שדות תעופה ושדות ניסוי, ובשטחי פזורה בדואית המיועדים לפינוי ולהסדרה. שטחים אלו אינם נבחרים כיום כי טרם מוצה הפוטנציאל באתרים נוחים יותר לפיתוח, אך בטווח הארוך הם משמשים עתודה משמעותית ביותר.

4 חשוב לציין כי כמות המים הנדרשת להפקת מימן ירוק אינה צפוייה להיות מהותית בכלל, בהשוואה לצריכת המים הלאומית (ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, 2023). על מנת לסבר את האוזן, בטכנולוגיה הנוכחית ניתן להפיק כשלוש טונות מימן בשנה מדונם אחד של קולטים פוטו-וולטאיים, תוך צריכת 27 מ"ק מים. בכמות מימן זו ניתן לתדלק בין משאית אחת המונעת במימן לשליש משאית בשנה, תלוי במשקלה ובנסועה. יש לציין כי השימוש במימן עשוי לבוא בצורת מנוע המונע במימן, או לחלופין במנוע חשמלי שנטען באמצעות טעינה מהירה מבוססת תא דלק מימני. אם בשנת 2050 יהיו בישראל כ-200 אלף משאיות בינוניות ומעלה (מעל 3.5 טונות), אזי לצורך הנעת 40 אחוזים מהן במימן ידרשו 100-150 אלף דונם המייצרים מימן ירוק. ניתן כמובן לשלב מימן כחול באספקה, ובכך להשיג יעד זה גם במחצית מהשטח. משרד האנרגיה מעריך בתרחיש המקסימום כי 278 אלף טונות מימן ישרתו את מגזר התחבורה בהיקפים אלו.

Cell Reports Physical Science, 1(9), 100174.
<https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2020.100174>
 Sadeq, A.M., Homod, R.Z., Hussein, A.K., Togun, H., Mahmoodi, A., Isleem, H.F., Patil, A.R., & Moghaddam, A.H. (2024). Hydrogen energy systems: Technologies, trends, and future prospects. *Science of The Total Environment*, 939, 173622.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173622>

הערות

- 1 שעת"ן – שווה ערך לטונה נפט. סך שעת"ן = 13,639. התרשים הוא עיבוד של נתוני למ"ס: מאזן אנרגיה (מפורט לפי מוצרים) 2024, אלפי שעת"ן.
 פילוח מאזן האנרגיה של מגזר החשמל לפי מקורותיו עובד לפי: רשות החשמל (2025). דו"ח מצב משק החשמל לשנת 2024, לוח 1.2: ייצור משקי. פילוח זה הוא אומדן מוערך, מאחר שהנתונים מסך הייצור מובאים ביחידות TWh, ונתוני מאזן האנרגיה הלאומי המובאים בתרשים נמדדים בשעת"ן (הוערך כי המדדים בני השוואה, בהתחשב בחלקו של כל מרכיב מסך ייצור החשמל).
- 2 ראוי לציין שחוקרים בתחום אכן התריעו בדיוק מפני תרחישים מסוג זה שנים מראש, למשל: וינשטוק ואלרן, 2016.
- 3 רשות החשמל (2020) זיהתה כי 85 אחוזים מעתודות השטח למתקנים סולאריים חדשים מצויים בנגב (חלק ניכר בנגב המערבי,