

השפעת הפיתוח הכלכלי על ההתדרדרות הסביבתית בישראל – ניתוח אמפירי

עאמר אבו־קרן*, ליה כהן וסלימאן אבו־בדר

המחלקה לכלכלה, אוניברסיטת בן־גוריון בנגב

* aamer@bgu.ac.il



חזית המחקר

שקיעה מחשמלת. במחקר זה נמצא שהמשק הישראלי עבר את נקודת המפנה: ישנו שיפור במדדי הפגיעה הסביבתית עם עליית רמת הפיתוח הכלכלי | צילום:

Phil Squires / פליקר. רישיון: CC BY-NC-SA 2.0

תקציר

הבנת יחסי הגומלין בין פיתוח כלכלי וצמיחה כלכלית לבין ההתדרדרות סביבתית היא אלמנט חיוני לתכנון ולגיבוש של מדיניות כלכלית המבקשת לקדם רווחה כלכלית תוך מניעת פגיעה בסביבה. במאמר זה נבחן את הקשר ארוך-הטווח בין מדדים סביבתיים, כגון מדך סביבתי בייצור ובצריכה ופליטות פחמן דו-חמצני לבין פיתוח וצמיחה כלכלית בישראל בששת העשורים האחרונים. בפרט, אנחנו בודקים אם הקשר של אינדיקטורים סביבתיים עם רמת הפיתוח הכלכלי מתאפיין בצורת U הפוכה (בהתאם להשערה של עקומת קוזנץ הסביבתית), כלומר, אם בשלבים מוקדמים של פיתוח גובר התייעוש ומוביל להתדרדרות סביבתית, בעוד שבשלבם מאוחרים יש היפוך מגמה ושיפור במדדים הסביבתיים בעקבות מעבר לשירותים והתגברות המודעות לפגיעה בסביבה. נוסף על כך, נבחנת השאלה אם תהליך של צמיחה כלכלית מוביל לפגיעה סביבתית.

אנחנו משתמשים בשיטות ARDL ו-FMOLS לבחינת קשרים ארוך-טווח בין משתנים סביבתיים לפיתוח כלכלי, וכוללים מספר משתני בקרה, כגון מדד פתיחות לסחר, השקעות זרות ישירות, מדד מורכבות כלכלית, ייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים והיצע הכסף.

התוצאות מצביעות על כך שמדד הפיתוח הכלכלי (תוצר לנפש) משפיע בצורה מובהקת על שלושת המדדים הסביבתיים, ושהקשר הוא בצורת U הפוכה, שמאששת את השערת עקומת קוזנץ הסביבתית. לעומת זאת, לא מצאנו השפעה מובהקת של צמיחה כלכלית (בהינתן רמת פיתוח נתונה) על המדדים הסביבתיים.

להבנת הקשר בין פיתוח כלכלי לפגיעה סביבתית חשיבות רבה עבור המשק הישראלי, שכן היא מאפשרת לעצב מדיניות המאזנת בין צמיחה ארוך-טווח לבין צמצום פליטות מזהמים. נוסף על כך, הבנה אמפירית של הקשר מסייעת בהערכת עלויות הזיהום, בבחינת כלי מדיניות, כגון מיסוי פחמן ואסדרה סביבתית, ובהערכת התאמת מסלול הצמיחה של המשק ליעדי האקלים ולמעבר הגלובלי לכלכלות דלות פחמן.

מילות מפתח: זיהום · טביעת רגל אקולוגית · מדך סביבתי · עקומת קוזנץ הסביבתית · פגיעה סביבתית · פיתוח כלכלי · פליטות פחמן דו-חמצני · צמיחה כלכלית

מבוא וסקירת ספרות

הצמיחה המואצת של המשק הישראלי בעשורים האחרונים הציבה אתגרים סביבתיים ייחודיים הנובעים מעומס גובר על משאבי הטבע המוגבלים. ישראל תורמת כ-0.5% מסך פליטות גזי החממה העולמיות, והמקור למרביתן הוא מגזרי האנרגיה והתעשייה שנשענים על שרפת פחם, נפט וגז טבעי^[16].

ישראל הציבה לעצמה יעד להפחתה של 27% של פליטות גזי חממה עד שנת 2030, יחסית לשנת 2015, עם שאיפה להגיע לאפס פליטות עד 2050. עם זאת, על פי הערכות בין-לאומיות, ישראל אינה צפויה לעמוד ביעדים האלה ללא צעדים משמעותיים נוספים בכל המגזרים, ובכלל זה אימוץ חקיקת אקלים מחייבת, וזאת נוסף על מנגנוני תמחור פחמן^[9], שהוגדרו לאחרונה בתקציב המדינה לשנת 2025.

דו"ח OECD לביצועים סביבתיים^[13] מצביע על כך שמדך הפחמן (Carbon Footprint) של ישראל עלה בהתמדה, אך החל לרדת בשנים האחרונות. עם זאת, פליטות מזהמים וגזי חממה ממגזרי התחבורה, התעשייה והפסולת המשיכו לעלות, למרות התייצבות יחסית בפליטות הכוללות בעקבות המעבר לשימוש בגז טבעי.

ישראל היא מהמדינות המובילות בפיתוח טכנולוגיות מתקדמות

וביישומן בתחומים התפלת מים, השקיה בטפטוף, צמצום תהליכי מדבור ומחזור שפכים. לעומת זאת, ישראל מפגרת אחרי מדינות מפותחות אחרות במעבר לאנרגיה נקייה. מקורות אנרגיה מתחדשים הגיעו בשנת 2023 לשיעור של כ-6% בלבד מתמהיל האנרגיה הראשונית בהשוואה לממוצע של 13% במדינות OECD^[1].

מדך סביבתי (טביעת רגל אקולוגית, Ecological Footprint) מודד את הביקוש של הפעילות האנושית לשטחי קרקע וים הזמינים לסיפוק משאבים ולספיגת פסולת, כולל למשל רכיבי פחמן, חקלאות, יערות ובנייה, והוא נמדד ביחידות של הקטר (10 דונם) גלובלי (gha) לנפש. נוהג להבחין בין מדך סביבתי בייצור ומדך סביבתי בצריכה. מדך סביבתי בייצור משקף את ההשפעה הסביבתית הישירה של מערך הייצור המקומי, והוא מודד את היקף השטח הביולוגי היצרני הנדרש לתמיכה בפעילות הכלכלית המתרחשת בגבולות של מדינה ללא תלות ביעד הסופי של התוצרים (צריכה מקומית או יצוא). מנגד, מדך סביבתי בצריכה משקף את ההשפעה הסביבתית הישירה של הצריכה המקומית, ומודד את היקף השטח הביולוגי היצרני הנדרש לסיפוק סל הצריכה של תושבי מדינה, ללא קשר





על קצה המזלג

- * ההשערה הגורסת כי בשלבים מוקדמים של פיתוח כלכלי הזיהום עולה עם הצמיחה, אך מרגע שמגיעים לרמת הכנסה מסוימת, המגמה מתהפכת והסביבה משתפרת, נבדקה במחקר על ישראל.
- * ישראל כבר עברה את נקודת המפנה. כיום העלייה ברמת החיים בישראל, הנמדדת כתוצר לנפש, מלווה בשיפור במדדי הפגיעה הסביבתית, כגון פליטות פחמן דו-חמצני ומדריך סביבתי.
- * נקודה בעייתית היא שישראל צורכת הרבה יותר משאבים ממה שהסביבה המקומית בה מסוגלת לחדש, דבר המעיד על הסתמכות גבוהה על יבוא עתיר משאבים וזיהום.
- * התרחבות סחר החוץ נוטה להעלות את הפגיעה הסביבתית, בעוד שמעבר לאנרגיה ממקורות מתחדשים ושיפור במורכבות הכלכלית של המשק תורמים להפחתתה.
- * הממצאים תומכים באימוץ כלי מדיניות, כמו מיסוי פחמן ועידוד טכנולוגיות ירוקות, כדי להבטיח שהמשק הצמיחה יתיישב עם עמידה ביעדי האקלים שישראל התחייבה אליהם.

מערכת אקולוגיה וסביבה

ההשערה של **עקומת קוזנץ הסביבתית** (Environmental Kuznets Curve – EKC). עקומה זו, המוצגת ב**איור 1**, מתארת כיצד הקשר בין פיתוח כלכלי לבין מצב הסביבה מתנהג בצורה של U הפוכה: בשלבים מוקדמים של פיתוח כלכלי חלה הרעה סביבתית בעקבות מעבר מייצור חקלאי לייצור תעשייתי מזהם. בשלבים מתקדמים של פיתוח יש מעבר מענפי התעשייה עתירי האנרגיה והמזהמים לענפי השירותים המזהמים פחות, שמביא לשיפור סביבתי. היפוך המגמה נובע, בין השאר, משיפורים טכנולוגיים המקטינים את הזיהום, ממודעות סביבתית מוגברת ומחקיקה ואסדרה (רגולציה) שנועדו להקטין את ממדי הפגיעה הסביבתית.

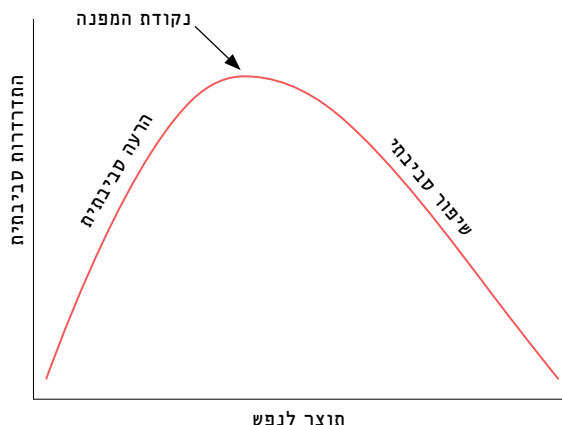
הספרות מתייחסת למספר סוגיות חשובות שיש לתת עליהן את הדעת בבואנו לנתח את השפעת הפיתוח הכלכלי על הסביבה. תחילה, הצורך בראייה גלובלית שבה יש להתייחס לא רק למזהמים מקומיים, כגון גופרית דו-חמצנית (SO_2), אלא גם למזהמים גלובליים, כגון פחמן דו-חמצני, ולמדרך סביבתי. שנית, פיתוח כלכלי אינו תהליך אקסוגני, ויש להתייחס גם לכיוון ההשפעה הנגדי, כלומר להשפעה שיש להתדרדרות סביבתית על פיתוח כלכלי. שלישית, יש להתייחס להשפעת סחר החוץ, שבמסגרתו מדינות מפותחות מעבירות ייצור מזהם למדינות מתפתחות, ולכן לא נצפה לשיפור סביבתי גלובלי ^[21, 6, 5].

מאמרים רבים בודקים בצורה אמפירית את קיומה של עקומת קוזנץ הסביבתית תוך שימוש במגוון רב של אינדיקטורים סביבתיים, מדינות ואזורים, תקופות ושיטות אקונומטריות. העדויות המתקבלות אינן עקביות, ואין קונצנזוס רחב בקרב חוקרים. למשל, נמצא קשר חיובי ארוך-טווח בין פליטות גופרית דו-חמצנית לתוצר לנפש במדינות מתפתחות ^[5], ולעומתו מחקר אחר השתמש במדריך סביבתי למדידת הפגיעה הסביבתית, ונמצאו בו עדויות לקיום העקומה רק במדינות עם הכנסה גבוהה או בינונית-גבוהה ^[2]. מחקרים מאוחרים סיפקו ממצאים דומים עבור מדינות מפותחות ^[19, 11]. לעומתם, מחקר שהשתמש בשיטת ARDL (ראו פרק שיטות המחקר) לא מצא עדויות מספקות לקיום העקומה במדינות הארקטיות ^[4], בעוד מחקר אחר ^[15] שהשתמש בשיטת FMOLS (ראו פרק שיטות המחקר) לבדיקת קיום עקומת קוזנץ הסביבתית ב-12 מדינות במזרח התיכון מצא עדויות לקשר של U בחמש מדינות, קשר של U הפוכה בשלוש מדינות, ולא קיבל קשר מובהק כלשהו בין פליטות פחמן דו-חמצני לפיתוח כלכלי בשלוש מדינות אחרות, כולל ישראל. מחקר אחר שהשתמש בשיטות פאנל לא מצא עדות לקיום עקומת קוזנץ הסביבתית בעשר מדינות במזרח התיכון, כולל ישראל ^[23]. מחקרים נוספים שמתייחסים לישראל, מצאו עלייה בפגיעה הסביבתית עם עליית התוצר לנפש ^[12, 3].

בשנים האחרונות יש מחקרים ^[25, 10] התומכים בקשר של עקומה סביבתית בצורת N. במחקרים הללו נטען שיש שלב מאוחר יותר לקשר בין סביבה לפיתוח, שבו הפגיעה הסביבתית חוזרת ומתחזקת. התופעה הזו מוסברת, בין היתר, בגידול מואץ בצריכה הפרטית

למיקום הגאוגרפי שפעולת הייצור התרחשה בו. המדד הזה כולל את ההשפעות הסביבתיות של מוצרים ושירותים המיוצרים מקומית וכן של כאלה המיוצאים מחו"ל בניכוי ההשפעות הסביבתיות של מוצרים המיועדים ליצוא. לפיכך, מדרך סביבתי בצריכה משקף את האחריות הסביבתית הגלובלית של דפוסי הצריכה המקומיים. נוסף על שני המדדים של מדרך סביבתי, חוקרים מתייחסים בדרך כלל לפליטות של פחמן דו-חמצני (הנמדדות בטונות לנפש) בבואם לכמת או להעריך את ממדי הפגיעה הסביבתית. נדבך מרכזי בדיון על הקשר בין פגיעה סביבתית לבין פיתוח כלכלי מבוסס על עבודתם של Grossman ו-Krueger ^[8] שהגו את

איור 1. השערת עקומת קוזנץ הסביבתית: הקשר בין ההתדרדרות סביבתית לפיתוח כלכלי



פסולת של משק מפותח | צילום: שחר בוקמן

ובביקוש למוצרים ולשירותים עתירי משאבים, וכן בהתרחבות דפוסי חיים עתירי אנרגיה, כגון תחבורה פרטית, טיסות וצריכת דיור. נוסף על כך, ברמות פיתוח גבוהות מאוד יש הסטה מרחבית של הפגיעה הסביבתית למדינות מתפתחות, כך שנגרמת הרעה סביבתית גלובלית.

במחקר זה בחנו את הקשרים ארוכי-הטווח בין המדריך הסביבתי ופליטות הפחמן הדו-חמצני לבין הפיתוח הכלכלי בישראל, תוך התמקדות בשאלה אם ניתן לזהות דפוס של עקומת קוזנץ הסביבתית בהקשר הישראלי. לשם כך, השתמשנו בשיטות אקונומטריות מקובלות לבחינת קשרים ארוכי-טווח בין מדדים של ההתדרדרות סביבתית לבין פיתוח כלכלי ובמגוון רחב של משתני בקרה המבוססים על הספרות העדכנית בתחום. לפי מיטב ידיעתנו, מאמרו הוא הראשון שבוחן את הקשר בין מגוון של אינדיקטורים סביבתיים מקובלים ורמת הפיתוח עבור המשק הישראלי על פני תקופה ארוכה ותוך שימוש בשיטות אקונומטריות מתקדמות של סדרות עתיות לבחינת הקשר, שנותנות מענה לביקורות שהועלו נגד השערת עקומת קוזנץ הסביבתית.

להבנת הקשר בין פיתוח כלכלי לפגיעה סביבתית יש חשיבות רבה, שכן הוא יאפשר לעצב מדיניות שתתאים למשק הישראלי הקטן, הפתוח והצומח, ותשלב בין המשך הצמיחה לבין צמצום פליטות מזהמים בטווח הארוך. כמו כן, הבנת הקשר תאפשר להעריך את עלות הזיהום למשק ולקבוע אם וכיצד להשתמש בכלים כמו שיוניים מבניים, מיסוי פחמן, תקינה או קידום טכנולוגיות ירוקות. הבנה אמפירית של הקשר הזה תאפשר לבדוק אם מסלול הצמיחה של המשק תואם את יעדי האקלים שהמדינה התחייבה אליהם, למנוע מצב שבו זיהום פוגע קשות באוכלוסיות מוחלשות, ולהבטיח שהתחרותיות של המשק הישראלי לא תיפגע כאשר המשקים בחו"ל עוברים במהרה לכלכלות דלות פחמן.

שיטות המחקר

לבחינת הקשר ארוך-הטווח בין המשתנים הסביבתיים לבין רמת הפיתוח הכלכלי ושאר משתני הבקרה במשק הישראלי בין השנים 1960–2023, השתמשנו בשיטת ARDL (Autoregressive Distributed Lag). ראו תיאור קצר של השיטה בנספח 1 (באתר כתב העת). מחקרנו בוחן את ההתדרדרות האקולוגית באמצעות שלושה אינדיקטורים מרכזיים: מדריך סביבתי בצריכה (Ecological Footprint in Consumption – EFC), מדריך סביבתי בייצור (Ecological Footprint in Production – EFP) ופליטות פחמן דו-חמצני (CO_2). מדדי המדריך הסביבתי בייצור ובצריכה נלקחו מתוך Global Footprint Network [7], ואילו פליטות פחמן דו-חמצני נלקחו מתוך Our World in Data [14]. המשתנים המסבירים העיקריים הם התוצר המקומי הגולמי לנפש וריבועו, המאפשרים לבחון קשר לא-ליניארי ואת תקפותה של השערת עקומת קוזנץ הסביבתית. בהתאם לספרות האמפירית,



פיתוח תשתיות גורם לניצול מקורות מוגבלים וללחץ על הסביבה | צילום: Lio Voo / pexels

לתיקוף הממצאים וכמבחן חוסן נעשה שימוש בשיטת FMOLS (Fully Modified OLS). השיטה הפרמטרית למחצה מתמקדת בקשרים ארוכי-טווח, ומתקנת הטיות הנובעות מאנדוגניות וממתאם סדרתי בשאריות, ובכך מספקת אומדנים עקביים ומדויקים גם במגבלות סטטיסטיות מחמירות הדורשות סדר אינטגרציה אחיד. לבחינת ההשערה שהאמידה שלנו מייצגת קשר כלכלי אמיתי ויציב לאורך זמן בין המשתנים הסביבתיים ובין המשתנים המסבירים בכלל, ורמת הפיתוח הכלכלי בפרט, אנחנו משתמשים במבחן הקואינטגרציה של Phillips-Ouliaris^[18].

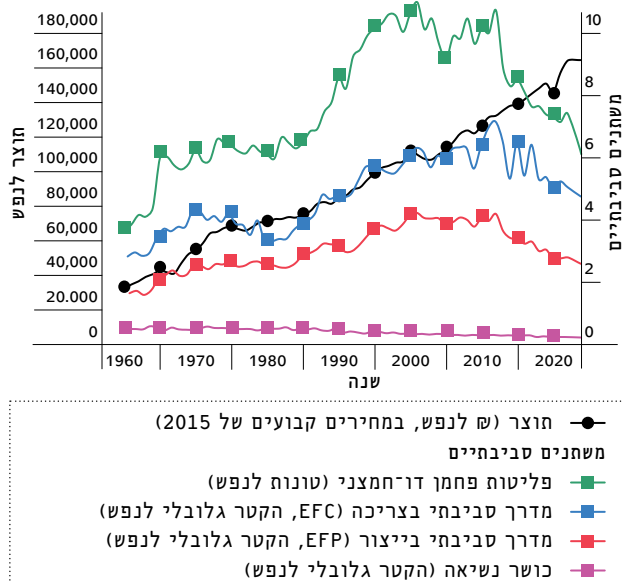
תוצאות

איור 2 מתאר מגמות של המדדים הסביבתיים והתוצר לנפש במשק הישראלי בששת העשורים האחרונים. ניתן לראות שהתוצר לנפש צומח בעקביות, ולעומתו, החל מסביבות שנת 2000 מגמת העלייה בהתדרדרות סביבתית, שמתבטאת בפליטות פחמן דו-חמצני ובמדרך הסביבתי של ייצור וצריכה, נקטעת, ונצפה היפוך במגמה, כך שמבחינה חזותית יש אינדקציה לקשר של U הפוכה בין המדדים הסביבתיים לרמת הפיתוח הכלכלי. עוד עולה מהאיור, שהמדרך הסביבתי בצריכה גבוה יותר מזה שבייצור. משמעות הדבר היא

המודל כולל משתנים כלכליים נוספים: קצב צמיחת התוצר הריאלי שנועד לבדיקת השפעת הצמיחה עבור רמה נתונה של תוצר לנפש, מדד פתיחות לסחר החוץ יחסית לתמ"ג, היצע הכסף הרחב ביותר (מזומן, עו"ש, פיקדונות לזמן קצר, חסכונות, פיקדונות לזמן ארוך ונכסים נזילים פחות) יחסית לתמ"ג (M3) וזרימת השקעות חוץ ישירות נטו יחסית לתמ"ג. המשתנים האלה נלקחו מתוך World Development Indicators (WDI)^[24] של הבנק העולמי. נוסף על כך, אנחנו כוללים מדד מורכבות כלכלית של המשק שמתייחס לגיוון ולייחודיות של הייצור במשק ומשמש ניבוי טוב לפוטנציאל הצמיחה של המשק^[20], ומדד של ייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים לנפש שנלקח מ־U.S Energy Information Administration (EIA)^[22].

שיטת ARDL מציעה יתרונות משמעותיים על פני שיטות קואינטגרציה (קשרים ארוכי-טווח) קלאסיות. שיטה זו מאפשרת לאמוד קשרים לטווח קצר וארוך ב־זמנית, תוך התמודדות עם בעיות אנדוגניות ומתאם סדרתי. יתרונה הבולט טמון ביכולתה לטפל במדגמים קטנים ולשלב משתנים בעלי סדרי אינטגרציה שונים (סטציונריים ובעלי שורש יחידה). לבחינת קיומו של קשר ארוך-טווח נעשה שימוש במבחני הגבולות (Bounds Tests) של Pesaran ואחרים^[17].

איור 2. התפתחות משתנים סביבתיים ותוצר לנפש בישראל על פני זמן



המוצגים בתחתית הטבלה מראים שקיימים קשרים ארוכי-טווח בין המשתנים הסביבתיים למשתני הפיתוח הכלכלי ולמשתנים המסבירים האחרים. התוצאות חזקות במיוחד כאשר מניחים שהמשתנים המסבירים, למעט פיתוח כלכלי, הם אקסוגניים, וכאשר המשתנה 'ייצור אנרגיה מקורות מתחדשים' נכלל כמשתנה מסביר. הממצא הבולט ביותר בטבלה 2 הוא שמקדמי התוצר לנפש (חיובי) וריבועו (שלילי) מובהקים מאוד סטטיסטית, עדות לכך שהקשר בין המשתנים הסביבתיים לרמת הפיתוח הכלכלי של

שרמת הצריכה המקומית גורמת להשפעה סביבתית גבוהה מזו הנוצרת בתהליכי הייצור המקומיים, כלומר מצביע על יבוא נטו עתיר משאבים וזיהום. דבר נוסף שעולה מאיור 2 הוא שלישאל יש גירעון ביוספרי (הפער בין המדרך הסביבתי לבין כושר הנשיאה של המשק) שמצביע על צריכה של יותר משאבים ממה שהסביבה המקומית יכולה לחדש בשנה אחת, וזהו מצב שאופייני למדינות מפותחות. לבחינת הקשרים ארוכי-הטווח בין המשתנים הסביבתיים לפיתוח כלכלי ומשתני בקרה נוספים בצורה מעמיקה השתמשנו בשיטות ARDL ו-FMOLS. הצעד הראשון בשתי השיטות האקונומטריות הוא בדיקת סדר האינטגרציה של המשתנים המוסברים והמסבירים. **טבלה 1** מציגה תוצאות של מבחן שורש יחידה של Augmented Dickey-Fuller עם קבוע ומגמת זמן, ומהן עולה ששלושת המשתנים המוסברים שלנו אינם סטציונריים, $I(0)$, אלא בעלי שורש יחידה, $I(1)$. נוסף על כך, כל המשתנים המסבירים הם סטציונריים או בעלי שורש יחידה, ועל כן ניתן להשתמש בשיטת ARDL. רוב המשתנים המסבירים הם בעלי שורש יחידה, ולכן אפשר להשתמש גם בשיטת FMOLS לזיהוי קשרים ארוכי-טווח בין המשתנים הסביבתיים למשתנים המסבירים, ובפרט רמת הפיתוח הכלכלי.

בטבלה 2 מוצגות תוצאות האמידה בשיטת ARDL בשני מפרטים; בהנחה שכל המשתנים המסבירים אנדוגניים, ובהנחה שרק משתנה הפיתוח הכלכלי הוא אנדוגני והשאר אקסוגניים. האמידה נעשית גם כאשר המשתנה 'ייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים' מושמט, שכן הוא זמין רק מ-1980, ועל כן הכללתו מורידה את מספר התצפיות הזמינות לאמידה.

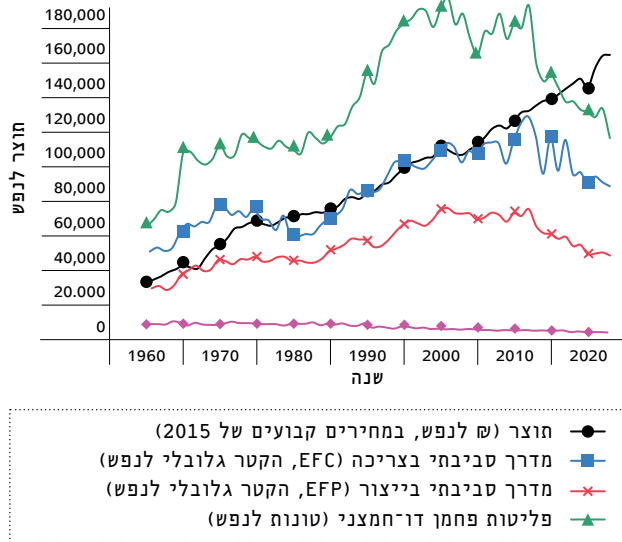
נספח 2 (באתר כתב העת), המציג בהרחבה את תוצאות האמידה בשיטת ARDL, מראה שאין עדות לבעיות מתאם סדרתי או שונות לא קבועה (הטרוסקידסטיות). כמו כן, ברוב המקרים מבחני הגבולות

טבלה 1. מבחני שורש יחידה (ADF)

המבחן כולל קבוע ומגמת זמן. מספר הפיגורים המיטבי נקבע על-ידי AIC עם מקסימום של ארבעה פיגורים.

המשתנים בהפרשים		המשתנים ברמות		משתנים
רמת מובהקות	סטטיסטי	רמת מובהקות	סטטיסטי	
0.000	-11.930	0.953	-0.931	מדרך סביבתי בצריכה (EFC)
0.000	-7.679	0.989	-0.307	מדרך סביבתי בייצור (EFP)
0.000	-9.424	0.983	-0.505	פליטות פחמן דו-חמצני
0.000	-7.754	0.785	-1.618	תוצר
0.000	-8.063	1	1.337	תוצר בריבוע
0.000	-5.663	0.000	-5.819	צמיחה
0.000	-7.874	0.250	-2.667	סחר חוץ
0.000	-7.103	0.137	-2.984	M3
0.003	-4.348	0.271	-2.619	מורכבות כלכלית
0.000	-8.392	0.033	-3.568	השקעות זרות
0.000	-6.166	0.269	-2.624	אנרגיה ממקורות מתחדשים

איור 2. התפתחות משתנים סביבתיים ותוצר לנפש בישראל על פני זמן



המוצגים בתחתית הטבלה מראים שקיימים קשרים ארוכי-טווח בין המשתנים הסביבתיים למשתני הפיתוח הכלכלי ולמשתנים המסבירים האחרים. התוצאות חזקות במיוחד כאשר מניחים שהמשתנים המסבירים, למעט פיתוח כלכלי, הם אקסוגניים, וכאשר המשתנה 'ייצור אנרגיה מקורות מתחדשים' נכלל כמשתנה מסביר. הממצא הבולט ביותר בטבלה 2 הוא שמקדמי התוצר לנפש (חיובי) וריבועו (שלילי) מובהקים מאוד סטטיסטית, עדות לכך שהקשר בין המשתנים הסביבתיים לרמת הפיתוח הכלכלי של

שרמת הצריכה המקומית גורמת להשפעה סביבתית גבוהה מזו הנוצרת בתהליכי הייצור המקומיים, כלומר מצביע על יבוא נטו עתיר משאבים וזיהום. דבר נוסף שעולה מאיור 2 הוא שלישאל יש גירעון ביוספרי (הפער בין המדרג הסביבתי לבין כושר הנשיאה של המשק) שמצביע על צריכה של יותר משאבים ממה שהסביבה המקומית יכולה לחדש בשנה אחת, וזהו מצב שאופייני למדינות מפותחות. לבחינת הקשרים ארוכי-הטווח בין המשתנים הסביבתיים לפיתוח כלכלי ומשתני בקרה נוספים בצורה מעמיקה השתמשנו בשיטות ARDL ו-FMOLS. הצעד הראשון בשתי השיטות האקונומטריות הוא בדיקת סדר האינטגרציה של המשתנים המוסברים והמסבירים. **טבלה 1** מציגה תוצאות של מבחן שורש יחידה של Augmented Dickey-Fuller עם קבוע ומגמת זמן, ומהן עולה ששלושת המשתנים המוסברים שלנו אינם סטציונריים, $I(0)$, אלא בעלי שורש יחידה, $I(1)$. נוסף על כך, כל המשתנים המסבירים הם סטציונריים או בעלי שורש יחידה, ועל כן ניתן להשתמש בשיטת ARDL. רוב המשתנים המסבירים הם בעלי שורש יחידה, ולכן אפשר להשתמש גם בשיטת FMOLS לזיהוי קשרים ארוכי-טווח בין המשתנים הסביבתיים למשתנים המסבירים, ובפרט רמת הפיתוח הכלכלי.

בטבלה 2 מוצגות תוצאות האמידה בשיטת ARDL בשני מפרטים; בהנחה שכל המשתנים המסבירים אנדוגניים, ובהנחה שרק משתנה הפיתוח הכלכלי הוא אנדוגני והשאר אקסוגניים. האמידה נעשית גם כאשר המשתנה 'ייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים' מושמט, שכן הוא זמין רק מ-1980, ועל כן הכללתו מורידה את מספר התצפיות הזמינות לאמידה.

נספח 2 (באתר כתב העת), המציג בהרחבה את תוצאות האמידה בשיטת ARDL, מראה שאין עדות לבעיות מתאם סדרתי או שונות לא קבועה (הטרוסקידסטיות). כמו כן, ברוב המקרים מבחני הגבולות

טבלה 1. מבחני שורש יחידה (ADF)

המבחן כולל קבוע ומגמת זמן. מספר הפיגורים המיטבי נקבע על-ידי AIC עם מקסימום של ארבעה פיגורים.

המשתנים בהפרשים		המשתנים ברמות		משתנים
רמת מובהקות	סטטיסטי	רמת מובהקות	סטטיסטי	
0.000	-11.930	0.953	-0.931	מדרג סביבתי בצריכה (EFC)
0.000	-7.679	0.989	-0.307	מדרג סביבתי בייצור (EFP)
0.000	-9.424	0.983	-0.505	פליטות פחמן דו-חמצני
0.000	-7.754	0.785	-1.618	תוצר
0.000	-8.063	1	1.337	תוצר בריבוע
0.000	-5.663	0.000	-5.819	צמיחה
0.000	-7.874	0.250	-2.667	סחר חוץ
0.000	-7.103	0.137	-2.984	M3
0.003	-4.348	0.271	-2.619	מורכבות כלכלית
0.000	-8.392	0.033	-3.568	השקעות זרות
0.000	-6.166	0.269	-2.624	אנרגיה ממקורות מתחדשים

רמה נתונה של הכנסה גורמת בדרך כלל לירידה שאינה מובהקת סטטיסטית בפגיעה הסביבתית, למעט כאשר המדריך הסביבתי בייצור הוא המשתנה המוסבר. לגבי שאר המשתנים המסבירים אין אפשרות להצביע על ממצאים גורפים. למשל, יש עדויות לכך שהתרחבות סחר החוץ של המשק גורמת בדרך כלל לעלייה בפגיעה הסביבתית רק כאשר מתייחסים למדריך הסביבתי ולא לפליטות פחמן דו-חמצני. נוסף על כך, הרחבה מוניטרית ועלייה במדד המורכבות הכלכלית מביאות לירידה מובהקת במדריך הסביבתי בצריכה. כמו כן, אין אינדיקציה לכך שהגברת ייצור של אנרגיה ממקורות מתחדשים תביא לירידה במדדי הפגיעה האקולוגית. לשם בחינת חוסן הממצאים נערכה אמידה נוספת בשיטת FMOLS, עם אותם מפרטים לעיל. תוצאות האמידה, המוצגות בטבלה 3 ובנספח 3 (באתר כתב העת), מתקפות את מסקנות המחקר: ראשית, מבחני הקואינטגרציה של Phillips-Ouliaris מצביעים על קשר ארוך-טווח מובהק בין המדדים הסביבתיים

המשק הישראלי אינו לינארי אלא מבטא קשר של U הפוכה. בקשר כזה יש עלייה בפגיעה הסביבתית עם העלייה בתוצר לנפש ברמות נמוכות של תוצר לנפש, והמגמה מתהפכת ברמות גבוהות יותר של התוצר לנפש. הממצא הזה מתיישב עם קיום של עקומת קוזנץ הסביבתית עבור המשק הישראלי. אנחנו מסיקים שהמשק הישראלי עבר את נקודת המפנה שבה חל שיפור סביבתי עם העלייה ברמת החיים, ולכן יש קשר הפוך בין הפגיעה הסביבתית לפיתוח כלכלי. מסקנתנו תקפה לשלושת משתני הפגיעה הסביבתית, אך ניתן לראות שהתוצאות חזקות יותר כאשר מתייחסים למדריך הסביבתי בצריכה. הרצנו את המודל גם עם סטים מגוונים של משתנים מסבירים (שאינם מובאים במאמר אך זמינים אצל המחברים לפי דרישה), ומסקנותינו נשארות ללא שינוי. בהסתמך על הספרות הקיימת ניסינו לכלול גם את אחוז העיוור, אך גילינו שהפיגורים שלו מתואמים מאוד, ולכן לא יכולנו להשאירו במודל. מעיון בטבלה 2 ניתן לראות שעלייה בקצב צמיחת המשק עבור

טבלה 2. קשרים ארוכי-טווח בין אינדיקטורים סביבתיים לפיתוח כלכלי ומשחני בקרה: שיטת ARDL
כיוון הקשר (+, -) ורמת המובהקות הגבולית (P-value) $0.1 < *, 0.05 < **, 0.01 < ***$.

אינדיקטור משתנים מסבירים	פליטות פחמן דו-חמצני				מדריך סביבתי בייצור (EFP)				מדריך סביבתי בצריכה (EFC)			
	אקסוגני למעט פיתוח כלכלי		הכול אנדוגני		אקסוגני למעט פיתוח כלכלי		הכול אנדוגני		אקסוגני למעט פיתוח כלכלי		הכול אנדוגני	
תוצר לנפש	***+	***+	***+	***+	**+	***+	***+	***+	+	***+	+	***+
תוצר בריבוע	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-	**	***-	***-	***-
שיעור צמיחה	-	-	-	-	-	**	-	*	-	-	-	-
סחר חוץ	*	-	-	-	+	+	+	+	+	*	-	***+
M3	+	-	-	-	+	-	+	+	-	*	-	**
מורכבות כלכלית	-	-	-	-	-	+	+	+	-	+	+	**+
השקעות זרות	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	**+	-
אנרגיה ממקורות מתחדשים	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	**+

טבלה 3. קשרים ארוכי-טווח בין אינדיקטורים סביבתיים לפיתוח כלכלי ומשחני בקרה: שיטת FMOLS
כיוון הקשר (+, -) ורמת המובהקות הגבולית (P-value) $0.1 < *, 0.05 < **, 0.01 < ***$.

אינדיקטור משתנים מסבירים	פליטות פחמן דו-חמצני				מדריך סביבתי בייצור (EFP)				מדריך סביבתי בצריכה (EFC)			
	אקסוגני למעט פיתוח כלכלי		הכול אנדוגני		אקסוגני למעט פיתוח כלכלי		הכול אנדוגני		אקסוגני למעט פיתוח כלכלי		הכול אנדוגני	
תוצר לנפש	***+	***+	***+	***+	***+	***+	***+	***+	***+	***+	***+	***+
תוצר בריבוע	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-	***-
שיעור צמיחה	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	+	-
סחר חוץ	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	***+
M3	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	**
מורכבות כלכלית	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	+	***+
השקעות זרות	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-
אנרגיה ממקורות מתחדשים	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+



פריקת מטענים בנמל אילת גורמת לזיהום אוויר השוקע למים | צילום: רויטל בוקמן

כמו כן, אין אינדיקציה לכך שהגברת ייצור של אנרגיה ממקורות מתחדשים הביאה לירידה בממדי הפגיעה הסביבתית. בדיקות חוסן נוספות שבוצעו באמצעות אמידת FMOLS מאששות את המסקנות המרכזיות בדבר קואינטגרציה וקשר ארוך טווח לא-ליניארי בין פגיעה סביבתית לפיתוח כלכלי שבמסגרתו יש עלייה בפגיעה הסביבתית בשלבים מוקדמים של פיתוח והיפוך מגמה בשלבי פיתוח מאוחרים. מנגד, ברוב המקרים השפעות שאר המשתנים המסבירים אינן מובהקות סטטיסטית.

כאמור, מאמרנו תומך בקיום עקומת קוונץ סביבתית עבור ישראל, ואלה חדשות מעודדות, מכיוון שמשמעות הדבר היא שהמשק הישראלי נמצא כבר אחרי נקודת המפנה בעקומה, ועל כן ישנו שיפור בממדי הפגיעה הסביבתית עם עליית רמת הפיתוח. למרות האמור, ישראל מפגרת אחרי מדינות בדרגת פיתוח דומה בהקשר של מדיניות וביצועים סביבתיים, ויש להאיץ את קצב

למשתנים המסבירים. שנית, נמצאה עדות לקשר לא-ליניארי בין רמת הפיתוח הכלכלי לפגיעה הסביבתית – קשר המקבל צורת U הפוכה, ובכך מאשש את השערת עקומת קוונץ הסביבתית. לבסוף, לא זוהו מגמות מובהקות סטטיסטית עקביות בהשפעתם של יתר המשתנים המסבירים מעבר למה שהוצג קודם.

התוצאות שמצאנו בדבר קיום קשר בצורת U הפוכה בין אינדיקטורים לפגיעה סביבתית לבין פיתוח כלכלי, סותרות מחקרים קודמים – שבוצעו עבור תקופות שונות, על אינדיקטורים סביבתיים אחרים ותוך שימוש בשיטות אקונומטריות שונות. במחקרים ההם לא נמצא קשר בין פגיעה סביבתית לפיתוח כלכלי, או שנמצאה הרעה סביבתית עם עליית התוצר הנפש ^[3, 12, 23].

דיון ומסקנות

הבנת הקשר בין פיתוח כלכלי לפגיעה סביבתית היא בעלת חשיבות רבה עבור המשק הישראלי, שכן היא מאפשרת לעצב מדיניות המאזנת בין צמיחה מתמשכת לבין צמצום פליטות מזהמים, בייחוד נוכח צפיפות האוכלוסין ומגבלות המשאבים של המשק. הבנה אמפירית של הקשר מסייעת בהערכת עלויות הזיהום הישירות והעקיפות. נוסף על כך, ניתוח כזה תומך בהערכת יעילותם של כלי מדיניות כמו מיסוי פחמן ואסדרה סביבתית, תוך בחינת השלכותיהם הפיסקליות והחלוקתיות. כמו כן, הוא מאפשר להעריך את התאמת מסלול הצמיחה של המשק ליעדי האקלים ולמעבר לכלכלה דלת-פחמן. במחקרנו בחנו את טיב הקשר בין שלושה אינדיקטורים של פגיעה סביבתית (מדרך סביבתי בצריכה, מדרך סביבתי בייצור ופליטות פחמן דו-חמצני) לבין רמת הפיתוח הכלכלי, המיוצגת על-ידי רמת התוצר הנפש במשק הישראלי בששת העשורים האחרונים, תוך שימוש בשתי שיטות לבחינת קשרים ארוכי-טווח בסדרות עיתיות, ARDL ו-FMOLS.

הממצאים של האמידה בשיטת ARDL מצביעים על קשר לא-ליניארי מובהק בין רמת הפיתוח הכלכלי לפגיעה הסביבתית, המתבטא בצורת U הפוכה, שבו יש עלייה בפגיעה הסביבתית בשלבים מוקדמים של פיתוח והיפוך מגמה בשלבים מאוחרים של פיתוח. על כן, ממצאינו תומכים בקיומה של עקומת קוונץ סביבתית במשק הישראלי. קשר זה נמצא עקבי עבור כלל מדדי הפגיעה הסביבתית, ובעוצמה גבוהה במיוחד כאשר נבחן המדרך הסביבתי בצריכה. הקשר נותר יציב גם בחלופות שונות של משתני בקרה מסבירים. השפעת צמיחת המשק על הפגיעה הסביבתית היא ברוב המקרים שלילית, אך אינה מובהקת סטטיסטית, למעט במקרה של המדרך הסביבתי בייצור. נוסף על כך, מחקרנו מספק עדות מסוימת לכך שהתרחבות סחר החוץ של המשק גורמת לעלייה במדרך הסביבתי אך אינה גורמת לעלייה בפליטות פחמן דו-חמצני. עוד מוצאים שהרחבה מוניטרית ועלייה במדד המורכבות הכלכלית מביאות לירידה מובהקת במדרך הסביבתי בצריכה.

