

יישום יעיל של סימביוזה תעשייתית

ארטיום ז'לנוב* ולימור חצור**

שאלת המחקר היא כיצד ליישם סימביוזה תעשייתית בצורה מוצלחת ומה הפלטפורמה המתאימה לכך.¹ אנו מנתחים באילו תעשיות כדאי ליישם סימביוזה תעשייתית ובאילו תעשיות סימביוזה תעשייתית תזיק לקיימות ויש לפתח טכנולוגיות חדשות טרם יישומה. בנוסף, נבחן כיצד רמת התחרות במשק משפיעה על התמריצים של כל חברה לאמץ סימביוזה תעשייתית. את תהליכי הייצור ניתן לחלק לשני סוגים עיקריים מבחינת הכדאיות של יישום כלכלה מעגלית. הסוג הראשון הוא תהליכי ייצור שבהם מתבקש כבר עכשיו יישום של כלכלה מעגלית כדי לשפר את הקיימות. האתגרים במקרה זה עשויים להיות חסמים פסיכולוגיים התנהגותיים, חסמי אינפורמציה וחסמים רגולטוריים ובירוקרטיים. הסוג השני הוא תהליכי ייצור אחרים, שבהם באופן פרדוקסלי סימביוזה תעשייתית עלולה להזיק לקיימות, בפרט כאשר טכנולוגיות הייצור מזהמות מאוד וכן האחוז מתוצרי הלוואי הניתן למחזור או לשימוש מחדש בתור חומרי גלם קטן יחסית. במקרים אלה, ההמלצה היא "ללכת צעד אחד אחורה". טרם היישום של סימביוזה תעשייתית, יש לתמרץ פיתוח של טכנולוגיות חדשות בתחום, ובפרט את ההשקעה הראשונית היקרה והמסוכנת במתקני פילוט, ניסויים ומחקר ופיתוח. לקח כללי מתוצאות המחקר שלנו הוא שיש ליישם טכנולוגיות חדשות שלא הוכיחו את עצמן רק לאחר שבוחנים אם התועלת גבוהה מהעלות עבור כל טכנולוגיה וכל תעשייה. עיצוב ברוח זו נועד ליישם סימביוזה תעשייתית יעילה ומוצלחת, אשר תפחית את הפוטנציאל של זיהום סביבתי.

א. מבוא. ב. רקע – כלכלה מעגלית וסימביוזה תעשייתית. ג. סימביוזה תעשייתית כתפיסה אוניברסלית. ד. הצעדים בעולם ליישום כלכלה מעגלית וסימביוזה תעשייתית. ה. סקירת ספרות. ו. המודל ליישום סימביוזה תעשייתית. ז. ממצאים. ח. דיון, מסקנות והמלצות. נספח – גרפים.

* המחלקה לכלכלה, אוניברסיטת אריאל, artiomjel@gmail.com

** המחלקה למנהל עסקים, מכון לב, limor.hatsor@gmail.com

1 סימביוזה תעשייתית היא גישה לטיפול בבעיות קיימות המעודדת שימוש מרבי במשאבים בתעשייה, בין היתר ליצירת עסקאות של רווחיות הדדית. הרעיון של סימביוזה תעשייתית הוא ליצור לולאות סגורות של ייצור, שבהן תוצרי הלוואי של הייצור חוזרים להיות חומרי גלם. באופן זה, כמות הפסולת מצטמצמת משמעותית. ראו Zofia Wysokińska, *The "New" Environmental Policy of the European Union: A Path to Development of a Circular Economy and Mitigation of the Negative Effects of Climate Change*, 19(2) COMPARATIVE ECONOMIC RESEARCH 57 (2016).

א. מבוא

במאה ה-20 חל גידול עצום באוכלוסיית העולם, בד בבד עם עלייה בתצרוכת וברמת החיים כפי שהיא נמדדת בתוצר לנפש. תמורות אלה החריפו את הלחץ על הסביבה והמשאבים והביאו זיהום אוויר, זיהום מקורות מים וקרקע ופגיעה באזורי מחיה, בפרט בישראל – מדינה קטנה וצפופה יחסית עם אקלים חם ומעט מקורות מים.² בשנים האחרונות אותרו בישראל כמה מאות אתרים הסובלים מזיהום בקרקע ובמים בשל סילוק פסולת מוצקה.³ כך למשל חוף תל אביב, הנמצא במקום השלישי בדירוג החופים המזוהמים בפלסטיק בים התיכון.⁴ ההשלכות של זיהום הן חמורות עקב היותו מפגע סביבתי ותברואתי. זיהום אוויר אחראי לתמותה של יותר מ-3 מיליון אנשים בשנה בעולם ולתחלואה, החל מאסטמה וכלה בהתקפי לב. עלויות הבריאות של זיהום אוויר במדינות המפותחות, כתוצאה ממוות וממחלות גם יחד, הגיעו לכ-1.7 מיליארד דולר בשנת 2010.⁵

הגרפים בנספח נועדו להמחיש את המחיר שגובות ההתפתחות הכלכלית והעלייה ברמת החיים. גרפים 1 ו-2 מציגים את התפתחות התוצר לנפש ותוחלת החיים ב-8 מדינות נבחרות (שתיים מכל יבשת) בין השנים 1960–2014. ניתן לראות שהתוצר לנפש ותוחלת החיים עלו לאורך הזמן בכל המדינות בסדרי גודל אדירים. גרף 3 מציג את אחד המדדים המוכרים לזיהום – פליטות פחמן דו-חמצני מדלק פוסילי (טון לאדם) – בין השנים 1800–2014 במדינות נבחרות. ניתן לראות שבישראל, שיעור הפליטות קפץ בעשרות אחוזים לאחר קום המדינה, מ-0.07 טון לאדם בשנת 1948 ל-3 טון לאדם בשנת 1960. בשנת 1970 שיעור הפליטות הכפיל את עצמו ל-6 טון לאדם ועלה מאז ל-8 טון לאדם בשנת 1990 ולשיא של 10 טון לאדם בשנת 2000. נראה כי בשנים האחרונות מגמת העלייה בזיהום האוויר נעצרה, ובשנת 2014 שיעור הפליטות עמד על 8 טון לאדם. גרף 4 מציג את כמות הפליטות של פחמן דו-חמצני במדינות ה-OECD נכון לשנת 2014. ניתן לראות שמצבה של ישראל חמור מאשר מצב מחצית מדינות ה-OECD (מקום 14 מתוך 37 מדינות ה-OECD, מקום 31 בעולם מתוך 193 מדינות). ניתן לראות שאתגרי הקיימות הולכים ומחריפים בד בבד עם ההתפתחות הכלכלית. סימביוזה תעשייתית היא אחת הדרכים שעשויות ליישב את אידיאל הצמיחה הכלכלית עם אתגרי הקיימות, ההולכים ומחריפים עם הזמן. הרעיון הוא לבנות רשת של ארגונים המשתפים פעולה לניצול משאבים ולהקטנת נזקי הסביבה. עבודה זו בוחנת כיצד ליישם סימביוזה תעשייתית בצורה מוצלחת ומה הפלטפורמה המתאימה לכך.

2 OECD, *Car Purchase Tax: Green Tax Reform in Israel* (2016)

3 יניב רוני זיהום קרקע בישראל – התופעה ודרכי הטיפול בה (2009).

4 הקרן העולמית לחיות בר (2019) World Wildlife Fund.

5 OECD, *The Cost of Air Pollution Health Impacts of Road Transport* (2014)

ב. רקע – כלכלה מעגלית וסימביוזה תעשייתית

כלכלה מעגלית הולכת ותופסת תאוצה בעולם כשיטה מבטיחה להתמודדות עם האתגרים של הקיימות במשקים מודרניים ועם סופיות המשאבים בכדור הארץ. במקום מודל ליניארי המבוסס על הפקת חומרי גלם לטובת ייצור מוצרים לשימוש חד-פעמי, כלכלה מעגלית מציעה מודל לצמצום הצורך בהפקת חומרי גלם חדשים, מניעת פליטות מזיקות לסביבה ובהמשך מיצוי חיי המשאבים דרך צריכה נבונה, מחזור או שימוש חוזר. כלכלה מעגלית דורשת שהייצור והצריכה יהיו מאורגנים באופן ששווי המוצרים, הרכיבים, החומרים והמשאבים נשמר בתוך שרשרת הערך ומחזור החיים של המוצרים.⁶ האסטרטגיה של שכלול הייצור ממצב ליניארי למעגלי יכולה לסייע לכך שהצמיחה הכלכלית לא תוביל לפגיעה במשאבים ובקיימות.⁷

סימביוזה תעשייתית היא אחד הכלים הבולטים בתחום של כלכלה מעגלית, המתמקד בתהליכי הייצור בתעשייה בניגוד לצרכן הפרטי ובאופן שבו ניתן לרתום את התעשייה לתהליכי ייצור סימביוטיים וידידותיים לסביבה. הפרדיגמה העומדת בבסיסו של מונח זה היא שיש לקדם שימוש חוזר במוצרים ובתוצרי הלוואי של תהליכי ייצור בתוך כל תעשייה ובין תעשיות, כך שפסולת תעשייתית או תוצרי לוואי של שחקן אחד משמשים כחומרי גלם או משאבים עבור שחקן אחר. שימוש חוזר (מעגלי) הוא חלופה אטרקטיבית לבזבוז, לעלייה בפסולת ולזיהום הסביבה הנובעים משימוש חד-פעמי.⁸ למשל, במקום לזהם את האוויר או המים בתוצרי לוואי של תהליך הייצור, מפעלים יכולים למכור את תוצרי הלוואי למפעלים אחרים כחומר גלם לשימוש חוזר. לפסולת של חומרים שונים – פלסטיק, מינרלים, צמיגים, אריזות פוליאצטילן, מזון וחומרים מסוכנים – יש פוטנציאל לשמש כמשאב, במקום להוות נטל כלכלי וסביבתי.⁹

מאחר שהתלות בחומרי גלם צפויה לגדול בשנים הקרובות, האידיאל הוא מערכת כלכלית שמטרתה לשמור על חומרי גלם ומשאבים (תוצרי לוואי, פסולת ואנרגיה) בתוך מערכת סגורה, החל משלב הייצור ועד סוף חיי המוצר, על מנת לצמצם את כמויות הפסולת ולמצות

6 Wysokińska, לעיל ה"ש 1.

7 Robberto Merli, Michele Preziosi & Alessia Acampora, *How do Scholars Approach the Circular Economy? A Systematic Literature Review*, 178 JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION 703 (2018).

8 Alan Murray, Keith Skene & Kathryn Haynes, *The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context*, 140 JOURNAL OF BUSINESS ETHICS 369 (2017).

9 לדוגמה, פסולת של תעשיית המזון עשויה לשמש לייצור ביודיול או קומפוסט; טקסטיל מיוצר בחלקו מפסולת של תהליכי ייצור אחרים; פסולת חקלאית עשויה לשמש כדשן לגידול יבולים אחרים, כתוסף למזון בהמות, לייצור ביוגז ואף לטיפול בקרקעות מזוהמות; במזון לבעלי חיים ובשפכים תעשייתיים ניתן להשתמש לגידול אצות; תוצרי נחושת במפעלי אלקטרוניקה עשויים לשמש כחומר גלם במפעלי מתכות; אריזות פלסטיק עשויות לשמש כחומרי גלם במפעלים מתחום הפלסטיקה; וכן ניהול נכון של אתרי בנייה עשוי לצמצם את כמות הפסולת במקור, להגדיל מחזור ושימוש חוזר ולייעל את האיסוף והטמנה.

את השימוש בחומרי הגלם. אם כן, לסימביוזה תעשייתית פוטנציאל ליישב את הצמיחה הכלכלית עם אתגרי הקיימות, מכיוון שמחד גיסא ביסודה הכרה בחשיבות הייצור להנעת הכלכלה, ומאידך גיסא דוגלת בשינוי תהליכי ייצור כדי למצות את השימוש בחומרי גלם ולחסוך ככל שניתן בתוצרי לוואי. משכך, סימביוזה תעשייתית זוכה בתמיכה לא רק של אנשי קיימות, אלא אף של אנשי משרד הכלכלה ותעשיינים (כפי שניתן היה להיווכח בוועידה לכלכלה מעגלית בשנת 2019). נרצה לבחון מתי היא אכן משיגה את מטרתה ומתי נדרשת זהירות ביישומה. אך קודם לכן נתאר איך הגישה של סימביוזה תעשייתית משתלבת בדוקטרינות עתיקות יותר ומהם הצעדים ליישומה בעולם ונסקור את הספרות הרלוונטית.

ג. סימביוזה תעשייתית כתפיסה אוניברסלית

סימביוזה תעשייתית משתלבת עם שתי דוקטרינות מרכזיות העומדות בבסיסן של הזכויות הסביבתיות. הראשונה, דוקטרינת הנאמנות הציבורית (the public trust doctrine), כלל רומי שצמח מכללי הצדק הטבעי, הקובעת שלכולם הזכות להשתמש בנכסים הציבוריים, כמו ימים, אגמים, נחלים, חופים ודגה, אך אסור לעשות שימוש השולל שימוש מאחר.¹⁰ הדוקטרינה השנייה מראה שקשה לקיים את הדוקטרינה של הנאמנות הציבורית בשל הפיתוי של היחיד להוסיף עומס על הנכסים הציבוריים והחצנת העלויות על הציבור. טרגדיית האזורים המשותפים מתבטאת בשימוש יתר במשאבי טבע ובאזורים משותפים, בכלל זה הזרמת שפכים ופסולת לאגמים ולנחלים מעבר למותר הפוגעת בשימוש של הציבור באותם משאבים, הן מבחינה אסתטית והן בשל הנזק לסביבה. בישראל דוגמאות רבות לפגיעה באיכות המים, באפשרות של הציבור לשחות, לדוג ולשוט וכמובן פגיעה בטבע – בבעלי החיים, בדגה ובצמחים שבסביבת מקור המים.¹¹ לעומת זאת, סימביוזה תעשייתית, בשל החתירה לשימוש חוזר בחומרי גלם, עשויה להקל את העומס על המשאבים הציבוריים ולתרום לשמירה עליהם ועל כן עולה בקנה אחד עם דוקטרינת הנאמנות הציבורית.

כמו כן, סימביוזה תעשייתית מוצלחת מסייעת לשמור על העיקרון של שיווי המשקל בטבע. בעבר הייתה מקובלת הגישה האנתרופוצנטרית הטהורה (האדם במרכז), הגורסת שלאדם מותר לנצל את משאבי הטבע כפי שהוא מוצא לנכון לתועלתו.¹² הגישה האנתרופוצנטרית הטהורה, המתרכזת ביתר שאת בתועלתו של האדם, פוגעת בטבע, וכתוצאה מכך גם באדם באופן פרדוקסלי. הגישה הרווחת כיום היא אנתרופוצנטריות נאורה: חובה לשמור על הטבע כיוון שהיחס שלנו לטבע מקרין על רמת האנושיות שלנו.¹³ גישה מתפתחת נוספת להגנה על הקיימות היא הגישה האוניברסלית, המכירה בבעלי חיים ומשאבי טבע כאישויות משפטיות

10 ע"א 1054/98 אדם טבע ודין נ' מגדלי חוף הכרמל נופש ותיירות בע"מ, פ"ד נו"ד (3) 385 (2002).

11 Garrett Hardin, *The Tragedy of the Commons*, 162 SCIENCE 1243 (1968).

12 FREDERICK ELDER, *CRISIS IN EDEN* (1970).

13 רע"א 1684/96 עמותת תנו לחיות נגד מפעלי נופש חמת גדר, פ"ד נא"ד (3) 832 (1997);

בג"ץ 11745-04 רמות למען הסביבה נ' המועצה הארצית לתכנון ולבניה (פורסם בבנו, 4.9.2008).

נפרדות בעלות זכות עמידה עצמאית.¹⁴ סימביוזה תעשייתית מוצלחת מסייעת לשמור על עקרונות אלה, המדגישים את השמירה על האיזון בטבע, בין אם כאישיות משפטית בעלת זכויות, בין אם כשיקוף לרמת האנושיות שלנו. זאת משום שסימביוזה תעשייתית מגבילה את השימוש של בני אדם במשאבי הטבע למינימום הנדרש באמצעות מיצוי הקיים ושימוש חוזר. מכאן החשיבות של עבודתנו, שנועדה להגדיר מהם התנאים לסימביוזה תעשייתית מוצלחת.

ד. הצעדים בעולם ליישום כלכלה מעגלית וסימביוזה תעשייתית

עקב התמיכה הגוברת והולכת בכלכלה מעגלית, מדינות רבות שואפות לקדם מדיניות ורגולציה לאימוצה של כלכלה מעגלית. למשל, האיחוד האירופי אימץ בשנת 2015 תוכנית פעולה ליישום כלכלה מעגלית, ליעול השימוש במשאבים בתעשייה ולהגדלת תעשיית המחזור. תקציב התוכנית היה יותר מ-10 מיליארד יורו בשנים 2016–2020, ובכלל זה 1.4 מיליארד יורו הוקצו לנושאים כמו תהליכי תעשייה ברי-קיימה, ניהול משאבים ופסולת ותהליכי ייצור מעגליים, מתוכם 350 מיליון יורו להפיכת תעשיית הפלסטיק למעגלית, 1.8 מיליארד יורו לתמיכה בטכנולוגיות חדשניות ו-5.3 מיליארד יורו לתמיכה ביישום חקיקת הפסולת של האיחוד האירופי.¹⁵ בנוסף, לאיחוד האירופי עשרה יעדים לפיקוח על כלכלה מעגלית המתעדכנים באופן תדיר באתר ייעודי ומסייעים לאיחוד האירופי להתקדם באופן הדרגתי לעבר יישום כלכלה מעגלית וסימביוזה תעשייתית.¹⁶ האיסור על שימוש חד-פעמי בפלסטיק, החובה לאסוף ולמחזר בקבוקי פלסטיק ומיסוי הפסולת נועדו להגביר את התמריצים לסימביוזה תעשייתית ולהפנמת העלויות החיצוניות של היעדרה. בישראל, פסולת הפלסטיק כולה מהווה כ-15% מסך כל משקל הפסולת הביתית וכ-30% מנפחה.¹⁷ כמה מדינות באיחוד האירופי, כמו הולנד, צרפת וסלובניה, מובילות בתחום הכלכלה המעגלית. למשל, צרפת אימצה מפת דרכים למעבר לכלכלה מעגלית הכוללת מטרות שאפתניות עוד יותר, כמו ירידה של 30% בצריכת המשאבים הטבעיים ביחס לתוצר לנפש בין 2010–2030, ירידה של 50% בכמות הפסולת שאינה מסוכנת ומחזור מלא של פלסטיק עד שנת 2025. התמיכה הבלתי מעורערת בעולם בסימביוזה תעשייתית מעלה את הצורך לבחון במשנה זהירות את תרומתה לקיימות ואת התנאים המתאימים לאימוצה. האם בכל המקרים סימביוזה תעשייתית תורמת לקיימות? נראה בעבודה זו שהתשובה המפתיעה היא לא בהכרח.

14 Christopher D. Stone, *Should Trees Have Standing? Towards Legal Rights for Natural Objects*, 45 S. CAL. L. REV. 450 (1972)

15 European Commission, *Circular Economy Action Plan* (2015)

16 Eurostat, *Circular Economy – Overview* <https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy>
 לדוגמה, איסור על שימוש חד-פעמי במוצרי פלסטיק ופלסטיק מתכלה עד שנת 2021; אמצעים להפחתת צריכה של כלי פלסטיק חד-פעמיים למזון ולשתייה; סימון מוצרים; 30% בקבוקי פלסטיק ממוחזרים עד שנת 2030; איסוף נפרד של 90% מבקבוקי הפלסטיק עד 2029; מיסוי פסולת פלסטיק מספינות ועוד.

17 פורטל מיחזור "מיחזור – ברוכים הבאים לפורטל מיחזור בישראל" www.recycling.co.il

בישראל פוטנציאל ההצלחה של תוכניות ליישום כלכלה מעגלית צפוי להיות גדול, מכיוון ששיעור המחזור נמוך יחסית לאירופה ועומד על פחות מ-20% לפסולת המוצקה.¹⁸ החוק לצמצום השימוש בשקיות נשיאה חד-פעמיות, התשע"ו-2016, הנודע גם בכינויו חוק השקיות משנת 2016, מחייב את המרכולים לגבות 10 אגורות עבור שקית ניילון על מנת להפחית את השימוש בפלסטיק. על פי תחשיב שערך המשרד להגנת הסביבה, החוק הפחית את השימוש בשקיות ניילון בכ-80% בתוך שנה.¹⁹ בנוסף, משרד הכלכלה מגבש תוכנית לאומית חמש שנתית לקידום כלכלה מעגלית שעליה נפרט בהמשך. ישנן כמה חברות בישראל שכבר מיישמות סימביוזה תעשייתית, כמו נשר מפעלי מלט ישראליים, המשתמש בתוצרי לוואי של מפעלים אחרים (אפר פחם מחברת החשמל, גבס תעשייה, שבבי ברזל, קרקעות מזוהמות וחומרים נוספים) כתחליף לחומר גלם טבעי (אבן גיר וחרסית). לפי נתוני החברה כפי שהוצגו בוועידה לכלכלה מעגלית,²⁰ בשנת 2019 החברה השתמשה בכ-700,000 טון חומרי גלם חלופיים ו-170,000 טון דלקים חלופיים, כ-30% מכמות הדלק שבשימוש. בין הדלקים החלופיים: RDF, צמיגים משומשים גרוסים, ממסים (סולוונטים) משומשים ועוד. כמו כן, קיימות בישראל חברות המספקות חלופות לפלסטיק שאינן מתכלה, כמו חברת "טיפה" TIPA, שמפתחת אריוזות מתכלות ביולוגית. לאחרונה אף נוסדה בישראל פלטפורמה לכלכלה מעגלית (מלכ"ר) החברה בפלטפורמה של האיחוד האירופי לכלכלה מעגלית.²¹ חרף התוכנית הלאומית לצמיחה ירוקה מ-2012, תהליכי הרישוי הסביבתי מרובים, סותרים ואינם אחידים ולא קיימת מסגרת ממשלתית לרישוי וצמיחה ירוקה, מה שמקשה על היצרנים לאמץ סטנדרטים סביבתיים.²²

ה. סקירת ספרות

כעת נסקור את הספרות המחקרית בכלכלת איכות סביבה בכלל ובכלכלה מעגלית בפרט. כאמור, אוכלוסיית העולם גדלה משמעותית בעשורים האחרונים, וכמוה עלתה רמת המחיייה, מה שהביא להתעצמות השימוש באנרגייה. תהליכי ייצור האנרגייה כרוכים בהשפעות שליליות על החברה והסביבה. ייצור חשמל רווי בהשפעות חיצוניות שליליות, כגון: חציבת חומרי גלם תוך גרימת זיהום למים והרס בתי גידול; שרפת פחם המזהמת את האוויר ויוצרת תחלואה ותמותה של בני אדם; שימוש במים על חשבון חקלאות או מערכות אקולוגיות אחרות ועוד.

- 18 מערכת infospot "מסחר בפסולת תעשייתית: 4 גופים זכו במענק להקמת פלטפורמת מסחר" info spot (11.3.2019). https://infospot.co.il/n/Industrial_waste_trading
- 19 מיכל רוזחיימוביץ' "חוק השקיות מוכיח את עצמו: הפחתה של 80% בצריכת שקיות" גלובס (17.7.2018). www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001246095
- 20 מערכת infospot "התוכנית הלאומית לכלכלה מעגלית" info spot (27.2.2020). https://infospot.co.il/n/National_Circular_Economics_Program
- 21 כלכלה מעגלית לישראל, Policy & Regulation, <https://circulareconomy.co.il/policy-regulation>
- 22 המשרד להגנת הסביבה, www.sviva.gov.il/InfoServices/ReservoirInfo/DocLib2/Publications/P0701-P0800/P0720.pdf

השפעה שלילית נוספת היא שינוי האקלים, שכבר הוביל לעלייה במפלס הים, לסופות קיצוניות ולבצורות.²³ בעיה מרכזית נוצרה משימוש באנרגייה ממאובנים, כמו פחם, נפט וגז, בכך שהוא מעלה את ריכוז גזי החממה באטמוספירה.

לנזקים הסביבתיים יש מחירים כלכליים, חלקם ברורים וקלים לאמידה, כדוגמת נזקי בריאות מיידיים הנגרמים מזיהום אוויר, וחלקם קשים יותר לאמידה, כמו שינויי האקלים. כדי להפחית את הנזקים הסביבתיים נדרשת התגייסות רחבה של הקהילה הבין-לאומית. אכן קיימת הכרה חוצת מדינות בצורך לפעול לצמצום פליטות גזי החממה וייצוב האקלים. עדות לכך ניתן לראות באמנות סביבתיות בין-לאומיות שהתרבו מאוד מאז מלחמת העולם השנייה, שמטרתן לרתום מדינות רבות ככל האפשר להפחתת הפגיעה בסביבה. הסכמים סביבתיים מאופיינים

בהצטרפות וולונטרית של מדינות והצבת יעדים מבלי להתחייב לדרך פעולה מסוימת.²⁴ על אף ההכרה הבין-לאומית הרחבה בצורך לפעול לצמצום הנזקים הסביבתיים, ובפרט לצמצום פליטת גזי החממה, בפועל המדינות אינן מצליחות לשתף פעולה באופן מספק. כך למשל בשנת 1997, במסגרת פרוטוקול קיוטו,²⁵ הסכימו 37 מדינות בעלות הכנסה גבוהה להגביל את הפליטות שלהן לחמישה אחוזים מתחת לרמות שנמדדו בשנת 1990 בשנים 2008–2012.²⁶ העובדה שההצטרפות לפרוטוקול הייתה של רשימה מוגבלת של מדינות גרמה לכך שבמקום היעד של הסדרת שני שליש מפליטות גזי החממה, הפרוטוקול נגע למדינות שאחראיות בסך הכול לכחמישית מכלל הפליטות.²⁷ נוסף על כך, הפרוטוקול לא הצליח לייצר יתרון כלכלי למדינות שעומדות בדרישות הפרוטוקול ולא הצליח למשוך מצטרפים חדשים.²⁸ ניסיון נוסף להפחתת גזי החממה נעשה בהסכם פריז שנחתם בשנת 2015. הסכם פריז קבע כיעד את הגבלת שינויי האקלים ל-2 מעלות צלזיוס מעל לרמות הטרם-תעשייתיות. גם כאן לא נקבעו סנקציות על הפרת ההסכם, ובפועל, המצב כיום דומה למצב בשנת 1994, העולם מכיר בסכנות של שינויי אקלים, אך אינו נוקט מדיניות אפקטיבית כדי לעצור זאת.²⁹

הקושי ליצור שיתוף פעולה יעיל בנושא נובע מהעובדה שמשאבי הטבע והשמירה על האקלים הם מוצרים ציבוריים, וככאלה קשה ליצור מנגנון שיחייב את כלל המדינות להשקיע בהם וימנע "רכיבה חופשית" (free-riding), כלומר מדינות שלא ישתתפו במאמץ, אבל ייהנו מהתוצאות שלו). זאת מכיוון שהחתימה על הסכמים סביבתיים כרוכה במחיר של ניהול משא

- 23 Erica Gies, *The Real Cost of Energy*, 551 NATURE S145 (2017)
- 24 Marco Battaglini & Bård Harstad, *Participation and Duration of Environmental Agreements*, 124 JOURNAL OF POLITICAL ECONOMY 160 (2016)
- 25 Christian Almer & Ralph Winkler, *Analyzing the Effectiveness of International Environmental Policies: The Case of the Kyoto Protocol*, 82 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT 125 (2017)
- 26 William Nordhaus, *Climate Change: The Ultimate Challenge for Economics*, 109 שם; 26 (2019) AMERICAN ECONOMIC REVIEW 1991
- 27 שם.
- 28 שם. במבחן התוצאה לא נמצאות השפעות מובהקות של אימוץ KP על פליטות גזי החממה; Almer & Winkler, לעיל ה"ש 25.
- 29 Nordhaus, לעיל ה"ש 26.

ומתן וקבלת הגבלות מרצון, שמועילות גם למדינות שאינן חלק מההסכם.³⁰ בנוסף, יוצרי הנזקים הסביבתיים אינם נושאים (לבדם) בעלויות ההשפעות החיצוניות השליליות שהם גורמים, אלא החברה כולה סופגת את הנזקים הסביבתיים.³¹ כדי שהסכמים בין-לאומיים בנושאי הסביבה יוכלו לתת מענה רחב ומחייב יותר, החוקרים מרקו באטאגליני ובארד הרסטאד ממליצים להשקיע בהגדלת מספר המדינות שמשותפות במשא ומתן וליצור הסכמים לפרקי זמן ארוכים.³² באופן הזה ישתלם למדינות להשקיע יותר באנרגייה ירוקה, מבלי לחשוש שהדבר ישים אותן בנקודת מיקוח פחות טובה בעתיד. בנוסף הם ממליצים שהסכמים יתמקדו רק ברמות הפליטה, ולא יעסקו בקביעת רף תחתון לרמת ההשקעות בפרויקטים סביבתיים. לעומת זאת, וויליאם נורדהאוס מציע כיוון חשיבה חדש.³³ הוא ממליץ לנטוש את הפרקטיקה של הסכמים בין-לאומיים במתכונת המקובלת כיום ולהחליף אותה במועדון אקלים. במסגרת המועדון המדינות יוכלו לקבוע מחיר לטון זיהום ולדאוג שיהיה נמוך מהמחיר של אי-ההשתתפות במועדון (על ידי מכסים שיוטלו על סחורות ממדינות שאינן משתתפות), כדי ליצור תמריץ למדינות להיות חלק ממועדון האקלים.

דרך נוספת להתמודדות עם הנזקים הסביבתיים שיוצרות המדינות היא ברמה המקומית. למרות שכדי לתת מענה שלם לפגיעה בסביבה נדרשת התגייסות בין-לאומית, יש לא מעט בעיות שניתן לפתור ברמה המקומית. פתרון בעיות ברמה המקומית ייטיב באופן ישיר עם תושבי המדינה (ובאופן עקיף עם העולם כולו). כך לדוגמה בסין, אחד הנושאים הכואבים ביותר לאזרחים הוא זיהום האוויר,³⁴ ופעולה להפחתתו תשפר את הרווחה של התושבים, שאף יהיו מוכנים לשאת ישירות בעלויות של הפחתת הזיהום.³⁵

הכלי המרכזי המשמש מדינות לטיפול בנזקי הסביבה הוא רגולציה. זי, יואן וחואנג מתארים שלושה סוגים של רגולציות סביבתיות. הסוג הראשון הוא תקני בקרה ופיקוח.³⁶ סוג זה של רגולציה מגביל את היקף פליטת המזהמים המותרת, ומפעלים שחורגים מהתקן נקנסים או נסגרים. היתרון של רגולציה זו הוא שכדי לעמוד בתקן, מפעלים יחפשו דרכים להפחית את הזיהום, וחלקם אף יעברו לשימוש באנרגייה ירוקה. עם זאת, עלול להיווצר מצב שעקב קביעת התקן, חברות שהצליחו לעמוד בדרישות יישארו ללא תמריץ להמשיך ולהשתפר בהיבטים סביבתיים. מידת ההצלחה של תקני הבקרה והפיקוח נקבעת בין היתר על ידי היעילות של

30 Battaglini & Harstad, לעיל ה"ש 24.

31 Gies, לעיל ה"ש 23.

32 Battaglini & Harstad, לעיל ה"ש 24.

33 Nordhaus, לעיל ה"ש 26.

34 Shanjun Li, *Better Lucky than Rich? Welfare Analysis of Automobile Licence Allocations in Beijing and Shanghai*, 85 THE REVIEW OF ECONOMIC STUDIES 2389 (2018)

35 Richard Freeman, Wenquan Liang, Ran Sond & Christopher Timmins, *Willingness to Pay for Clean Air in China*, 94 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT 188 (2019); Koichiro Ito & Shuang Zhang, *Willingness to Pay for Clean Air: Evidence from Air Purifier Markets in China*, 128 JOURNAL OF POLITICAL ECONOMY 1627 (2020)

36 Rong-hui Xie, Yi-jun Yuan & Jing-jing Huang, *Different Types of Environmental Regulations and Heterogeneous Influence on "Green" Productivity: Evidence from China*, 132 ECOLOGICAL ECONOMICS 104 (2017)

מדיניות האכיפה. כאשר מדיניות האכיפה מתבססת על מידע שמסייע להתמקד בחברות בסיכון גבוה להפרות משמעותיות, היא יעילה הרבה יותר מאשר במצב שבו הפיקוח נעשה באופן אקראי.³⁷

סוג שני של רגולציה הוא תקנות מבוססות שוק, שבהן מוטל מס על פליטות מזהמות ומתאפשר מסחר במכסות פליטה. תקנות מעין אלה מבוססות על מנגנוני מחירים, כך שעל ידי הגדלת עלויות הזיהום והפגיעה בסביבה, התעשייה מתמרצת ל"התנהגות סביבתית". במסגרת הרגולציה של תקנות מבוססות שוק יש הממליצים לאמץ מס פיגאוני, כלומר מס שמשקף את מלוא העלויות של ההשפעות החיצוניות השליליות. אלא שלמס פיגאוני יכולות להיות השלכות שליליות על הפעילות הכלכלית של המשק וכן על הכנסות המדינה ממיסים, ולכן הזהיר באראג' שבקביעת שיעור המס יש להתחשב באינטראקציה שלו עם יתר מערכת המיסוי.³⁸ מסיבה זו יש שהמליצו לקבוע שיעור מס מופחת על הפליטות המזהמות, ואכן כיום מחירי החשמל אינם כוללים את מלוא עלויות זיהום האוויר שהם יוצרים, היות שמיסי הבלו נמוכים ממס פיגאוני.

בעיה מרכזית שנוצרה בעקבות כך שהמס אינו משקף את מלוא ההשפעות החיצוניות השליליות היא שמחיר החשמל אינו משקף את עלותו האמיתית, דבר שמקשה על מעבר לאנרגיות ירוקות מתחדשות ומעודד צריכת חשמל מוגברת.³⁹ בחינת גמישות צריכת האנרגיה ביחס למחיר למשקי הבית מלמדת כי העלאת מחירי האנרגיה אכן מובילה לצמצום בצריכת אנרגיה שמתעצמת בטווח הארוך.⁴⁰

לכן נטען כי המאמץ המרכזי להתמודדות עם האתגרים הסביבתיים הגדולים של המאה ה-21 צריך להיות שיקוף מלא של עלויות ההספקה והסביבה במחירי האנרגיה.⁴¹ לעיתים קיימות טכנולוגיות יעילות שהיו מאפשרות חיסכון אנרגטי והיו מיטיבות עם כלל החברה (society), ולמרות זאת הן אינן מאומצות. מצב זה מכונה "פער ביעילות האנרגטית" והוא נוצר מכך שמי שיישא בעלויות של אימוץ הטכנולוגיה אומנם ייטיב עם כלל האנושות, אך יישא לבדו במחיר הכלכלי הכרוך בכך. הפער בין טובת הכלל לטובת הפרט או המדינה במקרה זה ממחיש את הקביעה שכל עוד התמחור של העלויות החיצוניות יהיה בחסר, לא ייעשו מאמצים מספיקים לאימוץ פתרונות סביבתיים.⁴² בעיה נוספת שנוצרת מקביעת שיעור מס מתחת לשיעור פיגאוני

Esther Duflo, Michael Greenstone, Rohini Pande & Nicholas Ryan, *The Value of Regulatory Discretion: Estimates from Environmental Inspections in India*, 86 *ECONOMETRICA* 2123 (2018).

Lint Barrage, *Optimal Dynamic Carbon Taxes in a Climate-Economy Model with Distortionary Fiscal Policy*, 87 *THE REVIEW OF ECONOMIC STUDIES* 1 (2020).

בת-אל נאור "התייעלות אנרגטית והפנמת העלויות החיצוניות במחיר החשמל" **מרכז מילקן לחדשנות** (2018) <https://bit.ly/34WdJ2D>.

Xavier Labandeira, Jose M. Labeaga & Xiral López-Otero, *A Meta-Analysis on the Price Elasticity of Energy Demand*, 102 *ENERGY POLICY* 549 (2017).

.Ian Parry, *Time to Price Energy Right*, *CLIMATE FINANCE* 88 (2020)

Todd D. Gerarden, Richard G. Newell & Robert N. Stavins, *Assessing the Energy-Efficiency Gap*, 55 *JOURNAL OF ECONOMIC LITERATURE* 1486 (2017)

נוגעת לתחום ההשקעות. נטען כי קביעת מיסי פחמן מתחת לשיעורי פיגאוי מעוותת את התמריצים להשקיע בנכסים ביחס לאופטימום החברתי ופוגעת בתפוקות העתידיות. על כן, כדי שלא להכביד את נטל המס הכולל מחד גיסא, וכדי לעודד השקעות שיאפשרו צמיחה מאידך גיסא, כדאי לבטל את המיסוי על רווחי הון.⁴³

הסוג השלישי של רגולציה המוזכרת אצל זי, יואן וחואנג הוא תקנות שאינן פורמליות.⁴⁴ סוג התמודדות זה רותם מנופי לחץ שונים, כדוגמת שימוש בכלי תקשורת לפרסום חברות שאינן מזהמות, נידוי צרכני ועוד, על מנת לקדם התחשבות בהיבטים סביבתיים. נראה כי קיימת בציבור נכונות לסייע במאמץ להפחית את הפגיעה בסביבה, והנגשת המידע על דרכים שבהן הציבור יכול להועיל יכולה להניב תוצאות טובות. הנחה זו מקבלת חיזוק ממחקר שנערך בשוויץ, לפיו כ־70% מהצרכנים יעדיפו מוצרים שייצורם כרוך בפליטת פחמן מופחתת, וחלקם הגדול אפילו יסכימו לשלם יותר תמורתם.⁴⁵

לאחר שסקרנו את כלי הרגולציה השונים, חשוב לדון במידת יעילותם וכיצד ניתן לייעל את השימוש בהם. כדי שהרגולציה תניב תוצאות מקסימליות, יש להכיר היטב את כל שרשרת ההספקה, החל מספקי הטכנולוגיה וכלה במשתמשי הקצה, ולנתח את ההשפעה העקיפה של הרגולציה.⁴⁶ יתר על כן, לעיתים מדינות קובעות רגולציה מתוך מטרה להפחית את רמת פליטות גזי החממה העולמית, אך למעשה הן גורמות לסגירה של תעשיות בתחומן והעברתן למדינות שבהן הפיקוח נמוך יותר, כך שהזיהום בסופו של דבר עולה וההכנסות שלהן נפגעות.⁴⁷ כמו כן, יש להקפיד שלא יהיו פרצות ברגולציה. כך, לדוגמה, כאשר קובעים מחירים להפרות של נוהלי בטיחות וסביבה, אך דורשים בטוחות, חברות יכולות לתכנן "הפרה משתלמת" במקרה שהן במצב כלכלי רעוע ועל סף חדלות פירעון.⁴⁸

בהקשר של יעילות הרגולציות טוענים וואלקר ושפירו של רגולציה הסביבתית היה תפקיד ראשי בהפחתה הדרמטית של זיהום האוויר בתעשייה בארצות הברית בין השנים 1990–2008.⁴⁹ הם אמדו את הנטל הרגולטורי הנובע מכלל הרגולציות שהוטלו על התעשייה ומצאו

43, Barrage, לעיל ה"ש 38.

44, Xie, Yuan & Huang, לעיל ה"ש 36.

45 Julia Blasch & Mehdi Farsi, *Context Effects and Heterogeneity in Voluntary Carbon Offsetting – A Choice Experiment in Switzerland*, 3 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND POLICY 1 (2014).

46 Chiara Franco & Giovanni Marin, *The Effect of Within-Sector, Upstream and Downstream Environmental Taxes on Innovation and Productivity*, 66 ENVIRONMENTAL AND RESOURCE ECONOMICS 261 (2017).

47 Aaron A. Elrod & Arun S. Malik, *The Effect of Environmental Regulation on Plant-Level Product Mix: A Study of EPA's Cluster Rule*, 83 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT 164 (2017).

48 Judson Boomhower, *Drilling Like There's no Tomorrow: Bankruptcy, Insurance, and Environmental Risk*, 109 AM. ECON. REV. 391 (2019).

49 Joseph S. Shapiro & Reed Walker, *Why is Pollution from US Manufacturing Declining? The Roles of Environmental Regulation, Productivity, and Trade*, 108 AM. ECON. REV. 3814 (2018).

שהודות לרגולציה, למרות שהייתה באותם שנים צמיחה בארצות הברית, הזיהום התעשייתי נחתך ב-60%. עוד נציין בעניין היעילות הרגולטורית כי רגולציה של תקנות מבוססות שוק נחשבת לפרודוקטיבית יותר מרגולציה של תקני בקרה ופיקוח, שכן היא מאפשרת לחברות גמישות גבוהה יותר בתהליך הפחתת הזיהום וכן מאפשרת לחברות לבחור בפתרון הטכנולוגי המתאים ביותר ואת התזמון של הטמעתו. נוסף על כך, תקנות מבוססות שוק נמצאו קשורות להתפתחות של תעשייה וטכנולוגיות ירוקות, בעוד שתקני בקרה ופיקוח לעיתים מונעים חדשנות.⁵⁰

לצד הרגולציות עומד למדינות כלי נוסף לטיפול בפגיעות הסביבתיות בתחומן, והוא מתן סובסידיות למחקר ולתעשייה ירוקה. ורובן ודה גרוטה מסבירים כי קיימים שני סוגים של תמריצים לעידוד משקי הבית לייצור אנרגיה ירוקה: סבסוד ההתקנה של המערכות וסובסידיות ייצור עתידיות.⁵¹ במחקרם הם בוחנים תוכנית סבסוד שהונהגה בבלגיה וכללה התחייבות לסבסוד הייצור למשך 20 שנים, מגיעים למסקנה שמשקי הבית מעריכים בחסר את התועלת הצפויה להם מהתוכנית ולכן ממליצים לעבור לסבסוד ההשקעה. כאשר משקיעים במתן מענקים, סבסוד ועידוד חדשנות, צריך לבחון האם התועלת גבוהה מהעלות.⁵² לעיתים מעודדים את משקי הבית לאמץ טכנולוגיות חדשות בעזרת מתן סבסוד, למרות שהטכנולוגיות עוד לא הצליחו להוכיח את עצמן ואין להן הצדקה כלכלית עבור העסקים או הצרכנים.⁵³ מס פיגוביאני (pigovian tax), המוטל על עלויות חיצוניות שליליות כמו זיהום אוויר, שמאפשר תחרות הוגנת בין אנרגיה מזהמת לאנרגיה ירוקה ומתן סובסידיות למחקר ופיתוח של טכנולוגיות ירוקות, יכול להוביל לכך שהטכנולוגיות הירוקות יהיו כדאיות כלכלית וסביבתית.⁵⁴ יעילותן של סובסידיות אף מוזכרת בהקשר של פער יעילות אנרגטית הנובע מחסמי כניסה. למרות שברמת הפרט קיימת הצדקה כלכלית לאימוץ הטכנולוגיה החדשה, עלות ההטמעה יקרה עבורו ועוצרת את אימוץ הטכנולוגיה היעילה. במקרים כאלה סובסידיות יכולות לתמרץ את האוכלוסייה לאמץ טכנולוגיה בעלת יעילות אנרגטית גבוהה יותר.⁵⁵ לאחר שסקרנו את הכלים לשמירה על קיימות ברמה בין-לאומית ומדינתית, יש לבחון האם יש כדאיות כלכלית להתנהגות סביבתית, למרות החשיפה לרוכבים חופשיים. במילים אחרות,

- Silvia Albrizio, Tomasz Kozluk & Vera Zipperer, *Environmental Policies and Productivity Growth: Evidence Across Industries and Firms*, 81 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND MANAGEMENT 209 (2017) 50
- Oliver De Groot & Frank Verboven, *Subsidies and Time Discounting in New Technology Adoption: Evidence from Solar Photovoltaic Systems*, 109 AM. ECON. REV. 2137 (2019) 51
- David A. Keiser & Joseph Shapiro, *Consequences of the Clean Water Act and the Demand for Water Quality*, 134 Q. J. ECON. 349 (2019) 52
- Meredith Fowlie, Michael Greenstone & Catherine Wolfram, *Do Energy Efficiency Investments Deliver? Evidence from the Weatherization Assistance Program*, 133 Q. J. ECON. 1597 (2018) 53
- Daron Acemoglu, Ufuk Akcigit, Douglas Hanley & William Kerr, *Transition to Clean Technology*, 124 JOURNAL OF POLITICAL ECONOMY 52 (2016) 54
- Nava Ashraf, Edward L. Glaeser & Giacomo A. Ponzetto, *Infrastructure, Incentives, and Institutions*, 106 AM. ECON. REV. 77 (2016) 55

האם מדינה יכולה לשמור על צמיחה בד בבד עם שמירה על קיימות? האם יכולה להתקיים "צמיחה סביבתית בת־קיימה"? הדעה המסורתית גורסת כי תקנות סביבתיות משפיעות לרעה על התחרותיות, שכן הן מטילות נטל נוסף על חברות. מצד אחד, חברות עומדות בפני עלויות ישירות הנגרמות מפעילות למניעת זיהום; מצד שני, ההשקעה הנדרשת מהחברות כדי לעמוד בתקנות עלולה לבוא על חשבון השקעה בהזדמנויות רווחיות אחרות.⁵⁶ לעומתה התפתחה השערה חלופית המכונה "השערת פורטר", לפיה כאשר התקנות הסביבתיות טובות, הן מעודדות חדשנות ובכך משפרות את תהליך הייצור ואיכותו באופן שמקנה יתרון תחרותי ומקזז את עלויות ההתאמה לרגולציה, ובכך דווקא תורמות לצמיחה.⁵⁷ ואכן, נמצא כי חדשנות אקולוגית מתמרצת על ידי תקנות סביבתיות מבוססות שוק ומדוכאת בהיעדרן.⁵⁸ נוסף על כך, הוכח כי החדשנות מאפשרת את המשך הצמיחה תוך הפחתת הנזקים הסביבתיים.⁵⁹

מחקרים רבים עוסקים בהשערת פורטר ובמידת תקפותה בכלכלות השונות. כך לדוגמה, על סמך מחקר שנערך בסין קבעו זי, יואן וחואנג כי לתקנות סביבתיות אין קשר ליניארי לצמיחה.⁶⁰ בתקני בקרה ופיקוח קיים טווח שתומך בצמיחה, וזאת כאשר התקינה אינה מקילה מדי, אך גם אינה מחמירה מדי. נוסף על כך, הם מצאו כי תקנות מבוססות שוק במתכונתן הנוכחית תורמות לצמיחה בסין, ובאופן משמעותי תורמות יותר לצמיחה מתקני פיקוח ובקרה. לעומתם, הי, טן, ליו, וזאנג מצאו כי השערת פורטר אינה נתמכת בסין, וכי לעיתים קרובות הרגולציה הסביבתית פוגעת בביצועים הכספיים של מפעלי הייצור.⁶¹ הקשר השלילי בין הרגולציה לתוצאות הפיננסיות מוסבר לדעתם בבעייתיות הקיימת בזכויות הקניין, שבגללה לא ניתן להבטיח שהשקעות בחדשנות יחזירו את עצמן. פרנקו ומרין בחנו את השערת פורטר בכמה מדינות באירופה ומצאו כי היא תקפה.⁶² ואן לואן ומוהנן מצאו שהשערת פורטר תקפה

- Xie, Yuan & Huang, לעיל ה"ש 36. 56
- Micheal E. Porter & Claas Van der Linde, *Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship*, 9 JOURNAL OF ECONOMIC PERSPECTIVES 97 (1995) 57
- Philippe Aghion, Antoine Dechezleprêtre, David Hemous, Ralf Martin & John Van Reenen, *Carbon Taxes, Path Dependency, and Directed Technical Change: Evidence from Acemoglu, Akcigit, ;the Auto Industry*, 124 JOURNAL OF POLITICAL ECONOMY 1 (2016); Hanley & Kerr, לעיל ה"ש 54. 58
- Yolanda Fernández, M.A López & Olmedillas B. Blanco, *Innovation for Sustainability: The Impact of R&D Spending on CO2 Emissions*, 172 JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION 3459 (2018); Yue-Jun Zhangab, Yu-Lu Pengab, Chao-Qun Ma & Bo Shenc, *Can Environmental Innovation Facilitate Carbon Emissions Reduction? Evidence from China*, 100 ENERGY POLICY 18 (2017) 59
- Xie, Yuan & Huang, לעיל ה"ש 36. 60
- Wenjian He, Laingmin Tan, Zhiyong J. Liu & Honxiou Zhang, *Property Rights Protection, Environmental Regulation and Corporate Financial Performance: Revisiting the Porter Hypothesis*, 264 JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION (2020) 61
- Franco & Marin, לעיל ה"ש 46. 62

במשק ההולנדי.⁶³ בנוסף, הם מצאו שכאשר התקנות מעודדות חידושים אקולוגיים המכוונים לחסכנות ויעילות בשימוש במשאבים, הפרודוקטיביות הכוללת (Total Factor Productivity) (TFP)) עולה. לעומתם, חידושים אקולוגיים שמיועדים להפחתת הזיהום נוטים להפחית את ה-TFP.

בנוסף לשתי ההשערות על הקשר בין רגולציה סביבתית לצמיחה, שהוצגו לעיל, קיימת גם גישת ביניים המתוארת על ידי עקומת קוזנץ הסביבתית (environmental kuznets curve). תאוריה זו גורסת כי הקשר בין הצמיחה הכלכלית לנפש לבין מזהמים שונים מתואר על ידי עקומה בצורת U הפוכה. כלומר, העלייה בהכנסה לנפש מגדילה תחילה את הפגיעה הסביבתית, אך בהמשך, כשההכנסה מוסיפה לעלות, הנזקים הסביבתיים מצטמצמים. הנימוק המרכזי לקשר זה נעוץ בכך שיחד עם העלייה בהכנסה לנפש, משתנה בהדרגה גם מבנה הכלכלה, מתעשייה מסורתית מזהמת לכלכלת שירותים נקייה יותר. בנוסף, מנקודה מסוימת העלייה בהכנסה לנפש מלווה בהגברת התודעה הסביבתית, והציבור דורש את צמצום הפגיעה הסביבתית.⁶⁴ אונגן, איסיק, אוזדמיר הצליחו להוכיח את השערת עקומת קוזנץ הסביבתית בארצות הברית, תוך התמקדות במגמת העלייה הכללית של ההכנסה לנפש ונטרול התנודות.⁶⁵ קיים ויכוח על הקשר שבין סחר חופשי לבין קיימות. מצד אחד, נטען בספרות הכלכלית שסחר חופשי מייצר צמיחה כלכלית, והצמיחה הכלכלית משחררת משאבים להשקעה בטכנולוגיות ירוקות.⁶⁶ מצד אחר, סחר חופשי עלול לפגוע בקיימות מכמה סיבות: אחת, סחר חופשי מביא לייצור מוגבר המוביל לניצול מוגבר של משאבי טבע ולפגיעה בקיימות. שתיים, סחר חופשי עלול לעודד ייצור במדינות מתפתחות שפחות מקפידות על קיימות. המשמעות היא העברת הייצור והזיהום הסביבה המתלווה אליו ממדינות מפותחות למדינות מתפתחות – תהליך הייצור (והזיהום הפוטנציאלי) נעשה במדינות המתפתחות, בעוד שהמדינות המפותחות נהנות מירידת מחירו של המוצר. במקום לחפש דרכים ליישום של סימביוזה תעשייתית, המדינות המפותחות מחצינות את עלויות הזיהום למדינות המתפתחות. על כן, כאשר המוצר מיובא ממדינות מתפתחות למדינות מפותחות, נדרש משנה זהירות, לא כל שכן כאשר ארגון הסחר העולמי עלול להגן על האינטרסים של הסחר על חשבון קיימות.⁶⁷ הילמן ויורספנג

George Van Leeuwen & Pierre Mohnen, *Revisiting the Porter Hypothesis: An Empirical Analysis of Green Innovation for the Netherlands*, 26 ECONOMICS OF INNOVATION AND NEW TECHNOLOGY 63 (2017)

Soumyananda Dinda, *Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey*, 49 ECOLOGICAL ECONOMICS 431 (2004)

Sendar Ongan, Cem Isik & Dilek Ozdemir, *Economic Growth and Environmental Degradation: Evidence from the US Case Environmental Kuznets Curve Hypothesis with Application of Decomposition*, 10 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND POLICY 14 (2020).

Lall Ramrattan & Michael Szenberg, *The Influence of International Trade on the Environment*, 9 JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ASSESSMENT POLICY AND MANAGEMENT 235 (2007).

Eric Neumayer, *Trade and the Environment: A Critical Assessment and Some Suggestions for Reconciliation*, 9 THE JOURNAL OF ENVIRONMENT & DEVELOPMENT 138 (2000)

מנתחים את ההשפעה של ארגונים ירוקים מסוגים שונים, כאלה שדואגים לקיימות במדינתם וכאלה שדואגים לקיימות בכל העולם, על מדיניות הסחר החופשי.⁶⁸

הדיון על אודות השפעת הסחר החופשי על מדינות מתפתחות מתקשר גם לשיח על אודות צדק אקלימי בתוך מדינות. המונח צדק אקלימי מתייחס לפן האתי והפוליטי של שינויי האקלים, תוך קישורו לתפיסות של צדק סביבתי, צדק חברתי, שוויון, זכויות חברתיות וזכויות קולקטיביות. ידוע שקל יחסית להגיע לקונסנזוס על אודות איסור זריקת פסולת בחופים, אך קשה להגיע להסכמה על בחירת מיקום למטמנת פסולת. אולם כשם שהתמריצים לסימביוזה תעשייתית עלולים להיות מוטלים לרעת מדינות מתפתחות, כך סימביוזה תעשייתית עלולה להיות מוטה לרעת הקבוצות המוחלשות המודרות מהתהליך הפוליטי בתוך המדינה. כלומר סימביוזה תעשייתית עלולה להוות כלי לחלוקה שאינה שוויונית של המשאבים במדינה, ובפרט להעברת הזיהום והפסולת לאזורים שבהם מתגוררות אוכלוסיות מוחלשות. סביר להניח שבעלי הכוחות החברתיים-פוליטיים יצליחו למנוע את הימצאות המפגע הסביבתי בקרבתם בהצלחה גדולה יותר מאלו שידם אינה משגת והם נטולי גישה למוקדי כוח וקבלת החלטות. לכן הפוטנציאל של יישום סימביוזה תעשייתית גדול יותר במפעלים המצויים במדינות מפותחות, כמו גם באזורים שבהם מתגוררות אוכלוסיות חזקות יותר.⁶⁹

גם הדיון על הדילמה של סחר חופשי מול פרוטקציוניזם הוא רחב יריעה ורב שנים בספרות הכלכלית. לדוגמה, הילמן ויורספנג וגרוסמן והלפמן טוענים ששיקולים פוליטיים פנימיים מביאים להחלטה להטיל מכסי מגן.⁷⁰ הוקמן וקוסטקי טוענים שמגבלות על סחר חופשי לכאורה מטעמי קיימות עשויות לנבוע משיקולים נסתרים של הגנה על השוק המקומי.⁷¹ כך לדוגמה, כאשר ארצות הברית חייבה שבדייג השרימפס שמיובא לשטחה יהיה שימוש במערכת הגנה על צבי ים. גם בדיונים על כלכלה מעגלית וסימביוזה תעשייתית מדינות עלולות לנקוט פרוטקציוניזם במסווה של דאגה לקיימות.

בפרספקטיבה רחבה יותר, אי אפשר שלא להבחין בכך שהמודל הכלכלי הקיים עשוי להוביל למיצוי המשאבים הזמינים ולמשבר אקלים שישפיע על הספקת המזון, מי השתייה ובריאות הציבור, ולכן הוא אינו מודל בר-קיימה.⁷² לעומתו, מודל הכלכלה המעגלית יכול לאפשר כלכלה בת-קיימה. סטאהל קורא להרחיב את המחקר כדי לתמוך בפיתוח מוצרים לשימוש ממושך, במערך של חלפים סטנדרטיים ובהערכת השימושים האפשריים.⁷³ בנוסף,

- Ayre L. Hillman & Heinrich W. Ursprung, *Domestic Politics, Foreign Interests and International Trade Policy*, 78 AM. ECON. REV. 729 (1988) 68
- איתי גרינשפן "תהליכי שינוי והתפתחות בתנועה הסביבתית בישראל: מאוריינטציה מדינתית לחברה אזרחית ושותפויות" **בטחון סוציאלי** 98, 157 (2015); דבורה שמואלי "צדק סביבתי במציאות הישראלית" **אקולוגיה וסביבה** 3, 36 (2010) 69
- Gene M. Grossman & Elhanan Helpman, *Protection for Sale*, 84 AM. ECON. REV. 833 (1994) 70
- BERNARD M. HOEKMAN & MICHAEL M. KOSTECKI, *THE POLITICAL ECONOMY OF THE WORLD TRADING SYSTEM: THE WTO AND BEYOND* (2009) 71
- Wysokińska; Merli, Preziosi & Acampora, לעיל ה"ש 7, לעיל ה"ש 1. 72
- Walter R. Stahel, *The Circular Economy*, 531 NATURE 435 (2016) 73

הוא מציע לשכלל את המודלים העסקיים כך שיתמכו בכלכלה מעגלית. במודלים אלה יהיה צורך בהרחבת שירותי התיקונים של המוצרים כדי לתמוך בשימוש ממושך. כמו כן, יש לפתח מודלים עסקיים שתומכים בהרחבת שירותי ההשכרה והליסינג של מוצרים וכאלה המאפשרים תשלום בהתאם לשימוש.⁷⁴

מרלי, פרזיוסי ואקמפורה טוענים, לאחר סקירה של מעל 500 מחקרים שעסקו בכלכלה מעגלית, שיש להקדיש יותר תשומת לב לעיצוב גישות חדשות של ייצור וצריכה.⁷⁵ כלומר, מעבר לעיסוק בהפחתת השימוש במשאבים ואנרגיה ושימוש חוזר במוצר, יש לתכנן כיצד ניתן להאט את לולאות החומרים על ידי מתן ערך בשיטות חדשות. לדוגמה, כלכלה שיתופית מאפשרת לתת מענה למספר גדול יותר של אנשים תוך שימוש בפחות משאבים. יישום נכון של הכלכלה המעגלית הוא בעל פוטנציאל גבוה, וסטאהל מעריך שביכולתו להפחית את פליטת גזי החממה של כל מדינה עד ל-70% מהפליטה כיום.⁷⁶

לצד האמור, חשוב לשים לב כי יישום כלכלה מעגלית אינו מבטיח את הפחתת הנזקים הסביבתיים. מחזור כרוך בשימוש באנרגיה כדי להתאים את הפסולת לייעודה החדש, ולעיתים אינו מחליף ייצור אחר, אלא מתווסף על הייצור הקיים ומעודד את הגברת הצריכה. רק כאשר בעזרת הכלכלה המעגלית משמרים את אותה רמת הייצור, תוך מיצוי גבוה יותר של המשאבים ושימוש יעיל יותר באנרגיה, יתקבלו תוצאות חיוביות לסביבה.⁷⁷ יש לציין שהאיחוד האירופי מודע לאתגרים אלה ומתייחס בזהירות לשימוש מחודש בפסולת. על כן האיחוד האירופי קבע באילו קריטריונים פסולת משנה את ייעודה והופכת למוצר או חומר גלם (end-of-waste criteria).⁷⁸ לא די בכך שהפסולת שימושית בתעשייה ויש לה ביקוש ושהשימוש נעשה על פי חוק ועומד בסטנדרטים של בטיחות, אלא גם השימוש אינו מוביל להשפעות שליליות על הסביבה או על בריאות הציבור ("the use will not lead to overall adverse environmental or human health impacts").

התרומה שלנו היא בכך שאנו מפתחים את טענתם של זינק וגיייר למקרים של סימביוזה תעשייתית.⁷⁹ אנו בוחנים באופן מובנה באילו מקרים סימביוזה תעשייתית עלולה להוביל להשפעות שליליות על הסביבה תוך שאנו מביאים בחשבון פרמטרים אקסוגניים. בפרט אנו מתחשבים בפרמטרים של תהליך הייצור, כמו פליטת הזיהום; האפקטיביות של תהליך הסימביוזה התעשייתית, כלומר האחוז מתוצרי הלוואי הניתן למחזור או לשימוש כחומר גלם בתהליכי ייצור אחרים; פרמטרים של השוק העולמי, כמו מחיר תוצרי הלוואי הנקבע בשוק העולמי, והיצרנים המקומיים רואים אותו כנתון; ופרמטרים של מדיניות, כמו המיסוי.

74 Andrea Urbinati, Vittorio Chiaroni & Davide Chiesa, *Towards a New Taxonomy of Circular Economy Business Models*, 168 JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION 487 (2017)

75 Merli, Preziosi & Acampora, לעיל ה"ש 7.

76 Stahel, לעיל ה"ש 73.

77 Trevor Zink & Roland Geyer, *Circular Economy Rebound*, 21 JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY 593 (2017)

78 Article 6 (1) and (2) of the Waste Framework Directive 2008/98/EC, https://ec.europa.eu/environment/waste/framework/end_of_waste.htm

79 Zink & Geyer, לעיל ה"ש 77.

המתודולוגיה שלנו לקוחה מעולם תורת המשחקים. אנו בונים מודל מיקרו-כלכלי לניתוח עלות-תועלת של סימביוזה תעשייתית ופותרים את שיווי המשקל במודל. כך אנו ממפים את המקרים שבהם סימביוזה תעשייתית מועילה לקיימות ואת המקרים שבהם היא אינה מבטיחה את הפחתת הנזקים לסביבה. כמו כן אנו מבצעים סימולציות, כלומר שינוי של פרמטר מסוים *ceteris paribus*, בהינתן שיתר הפרמטרים נשארים אותו הדבר, ובודקים איך משתנה שיווי המשקל.

לפי תוצאות המודל, סימביוזה תעשייתית עשויה לעודד ייצור מוגבר של מוצרי החברה, שכן הייצור הופך לרווחי יותר כאשר החברה מוכרת את תוצרי הלוואי שלה במקום לשאת בעלויות הטמנה של פסולת או קנסות על תוצרי הלוואי. משום כך נוצרים לחברה תמריצים חדשים להגביר את הייצור של מוצריה ככל שמחיר תוצרי הלוואי בשוק העולמי גבוה יותר. להגברת הייצור עשויות להיות השלכות חיוביות על רמת התחרות והריכוזיות בענף, אך בד בבד ההשלכות עלולות להיות הרוות אסון על הקיימות, כפי שנפרט להלן. למיטב ידיעתנו, אין לכך התייחסות בספרות על סימביוזה תעשייתית.

ההשלכות החיוביות קשורות ברמת התחרות והריכוזיות בענף. הגדלת הרווחים כתוצאה ממכירת תוצרי לוואי יוצרת תמריץ לחברה לייצר יותר ולחברות חיצוניות להיכנס לשוק. הגברת התחרות בתעשייה מביאה לירידת מחירים המועילה לצרכנים. כך סימביוזה תעשייתית עשויה להביא לירידת מחירים בענף. עם זאת, למרות שהתעשיינים עשויים לאמץ בשמחה פרויקטים של סימביוזה תעשייתית ואף להפיק מהם רווחים, הרווחה החברתית במובן של קיימות עלולה לקטון. הגברת הייצור עלולה לפגוע בקיימות בשל מגבלות (חסמים) טכנולוגיות של תהליך הייצור ושל הטכנולוגיות הקיימות לסימביוזה תעשייתית. המגבלות עשויות לנבוע מכמה פרמטרים טכנולוגיים, בין היתר טכנולוגיות ייצור מזהמות מאוד – אחוז תוצרי הלוואי הנוצרים בתהליך הייצור גבוה, עלויות גבוהות לאימוץ סימביוזה תעשייתית ואפקטיביות נמוכה של סימביוזה תעשייתית – וכשרק אחוז קטן מתוצרי הלוואי ניתן למחזור או לשימוש כחומר גלם בתהליך ייצור את. במקרים אלה יישום הסימביוזה התעשייתית והגברת הייצור עקב כך עשויים להגדיל את הזיהום שנוצר בסיום התהליך של הסימביוזה התעשייתית, וכך להזיק לקיימות.

לדוגמה, מחזור מכשירי אלקטרוניקה (electronics recycling) אמור לשמור על הסביבה מכמויות ענק של פסולת אלקטרונית מזהמת שנוצרת בכל שנה ברחבי העולם. כמויות ענק של מחשבים ניידים, מקלדות, מסכים ושלל מכשירים ניידים, מוזרמות ממדינות מערביות עשירות למדינות מתפתחות, בראשן סין, הודו, גאנה וניגריה, שעוסקות במחזור חומרים אלה. אולם בתהליך הפירוק של מכשירי האלקטרוניקה, כבלים ושאר רכיבי החיווט החשמלי נשרפים כדי לחשוף את הנחושת או האלומיניום שבהם ולמכור אותם בנפרד, דבר אשר מביא לפליטת גזים רעילים ומזהמים לאוויר ומאיים על בריאות הציבור, ובפרט על בריאותם של הפועלים העניים העוסקים במלאכה. במקרים מסוג זה סימביוזה תעשייתית עלולה לפגוע ברווחה החברתית.⁸⁰

Awasthi K. Abhishek, Xianlai Zeng & Jinhui Li, *Environmental Pollution of Electronic Waste Recycling in India: A Critical Review*, 211 ENVIRONMENTAL POLLUTION 259 (2016)

על כן, כאשר קיימים חסמים טכנולוגיים למימוש של סימביוזה תעשייתית, יש ללכת צעד אחד אחורה. בשלב הראשון, טרם המימוש של סימביוזה תעשייתית עלינו לעודד מחקר ופיתוח של טכנולוגיות ייצור חדשניות התומכות בסימביוזה תעשייתית לאורך כל מחזור החיים של המוצר, כלומר מקטינות זיהום הנפלט בתהליך הייצור, מקטינות את עלויות האימוץ של סימביוזה תעשייתית ומגדילות את האפקטיביות שלה (כך שאחוז גבוה מתוצרי הלוואי יהיה זמין לשימוש מעגלי). בשלב השני, לאחר הסרת החסמים הטכנולוגיים ניתן ליישם את הטכנולוגיות החדשות.

יש לציין כי גם לאחר שצלחנו את מכשול הטכנולוגיה, וסימביוזה תעשייתית היא win-win, כלומר טומנת בחובה רווח כלכלי ליצרנים והזדמנויות עסקיות וגם משפרת את הקיימות ואת הרווחה החברתית, עלולים להיקרות בדרכנו חסמים נוספים במימושה. יש להתגבר על חסמי אינפורמציה, כגון היעדר נגישות למידע על טכנולוגיות של סימביוזה תעשייתית ועל משתמשים פוטנציאליים של פסולת ותוצרי לוואי, וכן חסמים פסיכולוגיים התנהגותיים, כמו קושי בשינוי דפוסי מחשבה ובאימוץ טכנולוגיות חדשות. במקרים אלה,⁸¹ התערבויות רגולטוריות עשויות להביא להשפעות רחבות יותר של פרו-סביבה, שינוי עמדות ורגישות גוברת לנושאים סביבתיים. בנוסף, חסמים רגולטוריים ונטל ביורוקרטי עלולים להיווצר כתוצאה ממשך הזמן של תהליכי רישוי והיתרים, חקיקה שאינה ברורה ומדיניות סביבתית שאינה אחידה.

בנוסף, היעדר אכיפה של רגולציה סביבתית פוגעת בהרתעה ומייצרת תמריץ לאי-ציות, ובפרט עלולה להוביל לאימוץ חסר של סימביוזה תעשייתית. למשל, אם תוחלת הקנס על זיהום נחלים נמוכה מהעלות של אימוץ סימביוזה תעשייתית (כי החוק אינו נאכף כראוי), אזי משתלם לתעשיינים להפר את החוק כדי לחסוך בעלויות. קיימת הסכמה רחבה שעל מנת לקדם סימביוזה תעשייתית, נדרשים שינויים במערך תמריצי המדיניות והרגולציה הממשלתית, הנגשת מידע, בד בבד עם סטנדרטים וקנסות, והקטנת הנטל הביורוקרטי, בין היתר באמצעות קיצור תהליכי רישוי והיתרים ומדיניות סביבתית אחידה.⁸² שינויים אלה יקטינו את החסמים הרגולטוריים, החסמים הפסיכולוגיים וחסמי האינפורמציה.

1. המודל ליישום סימביוזה תעשייתית

מטרתנו העיקרית במחקר זה הייתה לגבש המלצות מדיניות לסימביוזה תעשייתית מוצלחת. לשם כך בחנו את הפרדיגמות העומדות בבסיס של סימביוזה תעשייתית ואת השלכותיה על איכות הסביבה ועל התחרות במשק. בפרט, בחנו את הפרדיגמות הבאות:

81 כפי שמציעים נילסון ואחרים: Andreas Nilsson et al., *Spillover Effects in Environmental Behaviors, Across Time and Context: A Review and Research Agenda*, 23 ENVIRONMENTAL EDUCATION RESEARCH 573 (2017).

82 רשות החדשנות "תכנית לאומית להתייעלות במשאבים וחדשנות סביבתית" (7.6.2018) https://innovationisrael.org.il/press_release/3790.

1. מעבר לכלכלה מעגלית הוא תמיד win-win לכולם.
 2. יישום סימביוזה תעשייתית בהכרח מונע ניצול בזבזני של משאבים ומשפר את הקיימות. לשם כך השתמשנו בכלים של תורת המשחקים ובנינו תאוריה שמדלת את התמריצים של כל פירמה לייצר ולמכור את תוצרי הלוואי שלה לפירמות אחרות. בדקנו את ההשלכות של יישום סימביוזה תעשייתית על רמת הייצור, התחרות והזיהום עבור פרמטרים שונים של תהליכי הייצור (סטטיקה השוואתית, comparative static) ולאחר מכן המחשנו את התוצאות באמצעות סימולציות. הכוונה לשינוי פרמטר אחד כאשר כל היתר קבועים ולבחינה איך שיווי המשקל משתנה. ניתוח זה מאפשר לדרג טכנולוגיות ייצור לפי רמת האטרקטיביות שלהן לאימוץ סימביוזה תעשייתית ולהתאים לכל טכנולוגיה את כלי המדיניות המתאימים שיסייעו בשימון גלגלי הכלכלה המעגלית.
- להלן תיאור כללי של המודל המתמטי שבנינו. המודל מכיל כמה הנחות סטנדרטיות המקובלות בספרות הכלכלית. נניח שישנן (n) חברות המתחרות בענף תעשייה מסוים. ככל שמספר החברות גדול יותר, יש יותר תחרות באותו ענף. כל החברות זהות וכולן מייצרות את אותו מוצר. נסמן ב- q את מספר היחידות של המוצר שכל פירמה מוכרת. נניח כמקובל שעלות הייצור גדלה ככל שמייצרים יותר יחידות, ובפרט עלות הייצור היא cq^2 , כאשר c הוא קבוע חיובי.
- כדי למפות את החסמים לסימביוזה תעשייתית, המודל כולל כמה פרמטרים מהותיים של תהליכי הייצור בענפים שונים של התעשייה. הפרמטרים הם אקסוגניים ייחודיים לכל תהליך ייצור ומתארים את הטכנולוגיות הקיימות לייצור ולסימביוזה תעשייתית (מחזור או מכירת תוצרי הלוואי לשימוש חוזר). הפרמטר הראשון הוא אחוז הזיהום g (הפסולת או תוצרי הלוואי) הנפלט בתהליך הייצור פר יחידה של המוצר הסופי. ישנם תהליכי ייצור שבהם אחוז הזיהום נמוך, וישנם תהליכי ייצור שידוע שאחוז המזהמים והפליטות שבהם גבוה ומסוכן יותר. נניח שהפרמטר נע בין $0-1$, כאשר 0 משמעו שאין זיהום בתהליך הייצור ו- 1 משמעו שכל יחידה של המוצר הסופי גורמת לפליטת יחידת זיהום אחת.
- הפרמטר השני, גם הוא נע בין $0-1$, מתאר את האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית, כלומר בכמה אחוזים מתוצרי הלוואי ניתן לעשות שימוש מחדש, בין אם במחזור, בין אם בתור חומרי גלם בתהליך ייצור אחר. מלבד רמת הזיהום g הנפלטת בתהליך הייצור, חשוב לבחון גם כמה מתוצרי הלוואי ניתן למחזר. אם תהליך הייצור פולט מזהמים רבים, אך קיימות טכנולוגיות מוכחות וזולות לנטרולם ולשימוש רב-פעמי בתהליכי ייצור אחרים, מצבנו טוב לאין ערוך מאשר אם האפקטיביות של סימביוזה תעשייתית נמוכה. במסגרת המודל שלנו החברה יכולה למכור חלק מתוצרי הלוואי של תהליך הייצור (α) לתעשיות האחרות בתור חומר גלם. אזי הפרמטר α מודד את האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית. כמו כן, מכיוון שברוב הענפים מחזור מלא או מכירה מלאה של תוצרי הלוואי אינם אפשריים מבחינה טכנולוגית, אנחנו מניחים ש- $0 < \alpha < 1$, כאשר $\alpha = 1$ הוא החלק מתוצרי הלוואי שעדיין אינו ניתן לשימוש מחדש בטכנולוגיות הקיימות.
- הפרמטר השלישי שאותו חשוב להביא בחשבון הוא העלויות הכלכליות של היצרן ליישום סימביוזה תעשייתית, שנסמן ב- (c_g) . למכירת תוצרי הלוואי של תהליך הייצור ישנה עלות קבועה, הכוללת עלות רכישת ידע וחיפוש של קונים פוטנציאליים לתוצרי הלוואי, התאמת

תשתיות ייצור, שינוע ולוגיסטיקה וכיוצא בזה. לדוגמה, מיזם ה-RDF המשותף לנשר, ורידיס ואיגוד ערים דן לתברואה (חירייה) מאפשר לנשר להשתמש בפסולת ממוינת כדלק חלופי. לפי נתוני החברה כפי שהוצגו בוועידה לכלכלה מעגלית,⁸³ המיזם הצליח בין השאר הודות להשקעה של מאות מיליוני שקלים בהקמת מפעל ה-RDF והשקעה נוספת של עשרות מיליוני שקלים בצי משאיות ומתקני תשתית לשינוע וקליטת ה-RDF במפעל נשר. אתגרי שינוע ולוגיסטיקה עשויים לנבוע גם מהיעדר מפעלי מחזור בארץ, חסם המאלץ מפעלים בישראל המעוניינים ליישם סימביוזה תעשייתית לשלוח, למשל, את פסולת הפלסטיק למפעל מחזור בחו"ל ואז לרכוש חזרה חומר גלם ממוחזר – תהליך שמייקר את הייצור.

הפרמטר הרביעי במודל שלנו הוא אחוז הקנס על הזיהום d שאותו המדינה מטילה על היצרן כדי שיפנים את עלויות הזיהום (סך הקנס שמשלם היצרן הוא d כפול רמת הזיהום g). היצרן יכול לשלם את הקנס, או לחלופין לחסוך אותו בכך שיישם סימביוזה תעשייתית. את העלויות של סימביוזה תעשייתית היצרן שוקל אל מול התועלת ממכירת תוצרי הלוואי הנפלטת בתהליך הייצור. המחיר של יחידת תוצרי לוואי בשוק העולמי הוא $p_g < 0$, ולכן עסקת סימביוזה תעשייתית (עסקה למכירת תוצרי הלוואי בשוק) מגדילה את ההכנסות של החברה ב- Π_g במקביל מקטינה את הקנס שהיא משלמת על כל יחידת מוצר. אנו מניחים כמקובל שהשוק הישראלי קטן יחסית לשוק העולמי, ולכן ליצרנים המקומיים אין השפעה על המחיר העולמי.

הפרמטרים שלעיל הם המשתנים הבלתי תלויים של המודל. אנו פותרים את שיווי המשקל הכלכלי בהינתן הפרמטרים, כלומר עבור כל ערך אפשרי של הפרמטרים (בתוך התחומים שהגדרנו להם). בשיווי המשקל הכלכלי, המשווה את הביקוש להיצע של המוצרים, אנו מחשבים עבור כל פירמה בתעשייה את המשתנים התלויים הבאים: האם היא תחליט ליישם סימביוזה תעשייתית, כמה היא תייצר ומחיר המוצר הסופי שייקבע בשוק. בנוסף, אנו בוחנים מתי תתקיים סימביוזה תעשייתית ואת השלכותיה של סימביוזה תעשייתית על רמת התחרות בשוק ועל רמת הזיהום בתהליך הייצור. בנוסף, אנו ממיים את המקרים שבהם האפשרות ליישם סימביוזה תעשייתית תורמת לקיימות ואת המקרים שבהם סימביוזה תעשייתית מזיקה לקיימות.

המודל נפתר בכלים סטנדרטיים בכלכלה. כלומר אנו מוצאים את שיווי המשקל של המודל עבור הפרמטרים של המודל. שיווי המשקל מוגדר כנקודה שבה הצרכנים והיצרנים לא ירצו לשנות את החלטתם. כלומר בשיווי המשקל היצרנים ממקסמים את הרווחים שלהם, בהינתן הביקוש מצד הצרכנים, והצרכנים משיגים בשוק את הכמות שרצו לקנות. את החישוב עושים בשני המקרים: כאשר סימביוזה תעשייתית מיושמת וכאשר היא אינה מיושמת. להלן שיווי המשקל שמתקבל במודל, בהתאם להנחות שפורטו ולפרמטרים שהגדרנו לעיל. הרווח של היצרן שמיישם כלכלה מעגלית:

$$\pi = -c_g + \frac{c[a - dg + ag(d + p_g)]^2}{(c + bn)^2}$$

83 מערכת infospot "התוכנית הלאומית לכלכלה מעגלית", לעיל ה"ש 20.

כאשר a הוא החותך של פונקציית הביקוש ו- b זה השיפוע. כמות הזיהום שאינו ממוחזר כאשר מיישמים כלכלה מעגלית:

$$\frac{(1 - \alpha)gn [a - dg + \alpha gd + p_g]}{2c + bn}$$

הרווח של היצרן שאינו מיישם כלכלה מעגלית:

$$\pi = \frac{c [a - dg]^2}{(2c + bn)^2}$$

כמות הזיהום כאשר אין מיישמים כלכלה מעגלית:

$$\frac{gn [a - dg]}{2c + bn}$$

מהשוואה של הביטויים שלעיל וניתוח שלהם בכלים של אנליזה מתמטית סטנדרטית, מתקבלים הממצאים של המודל.

ז. ממצאים

תוצאה ראשונה שהתקבלה במודל הייתה שכלל שהענף תחרותי יותר (מספר החברות n בענף מספיק גדול), אזי חברות יעדיפו פחות להצטרף לסימביוזה תעשייתית. הסיבה לכך היא שכלל שהשוק תחרותי יותר, שולי הרווח של החברות קטנים, ולכן קשה יותר לכל חברה לשלם את ההוצאות הקבועות של ההצטרפות לסימביוזה תעשייתית. במקרה זה, על מנת לעודד סימביוזה תעשייתית, נדרש להוריד את ההוצאות הקבועות, מה שיכול להיעשות, למשל, על ידי צמצום הנטל הרגולטורי והבירוקרטיה, רגולציה המעודדת כלכלה מעגלית וכן הנגשת מידע על טכנולוגיות זמינות של סימביוזה תעשייתית, שימושים פוטנציאליים לפסולת וקונים פוטנציאליים של הפסולת.

תוצאה שנייה שמצאנו היא שסימביוזה תעשייתית מגדילה את רווחיות היצרנים. הסיבות הן שהכנסותיהם גדלות בשל מכירת תוצרי הלוואי והקנס שהם משלמים פר יחידת מוצר קטן. משום כך סימביוזה תעשייתית מביאה להגדלת הכמות המיוצרת, הגברת התחרותיות בענף וירידת המחיר של המוצר. השפעה זו כשלעצמה טובה לצרכנים.

עם זאת, כשבוחנים את ההשפעה הכוללת של סימביוזה תעשייתית מגלים שבאופן פרדוקסלי הגדלת הייצור עלולה להביא ליותר זיהום ולפגיעה בקיימות. תוצאה זו מתקבלת עבור פרמטרים מסוימים של התעשייה והטכנולוגיה, בפרט כאשר טכנולוגיות הייצור מזהמות מאוד והאפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית נמוכה, כלומר האחוז מתוצרי הלוואי שניתן למחזר או למכור לשימוש נוסף קטן יחסית. בפרט, מהנוסחה של כמות הזיהום שאינו ממוחזר שהובאה לעיל עולים הממצאים הבאים:

1. אם האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית η שואפת ל-1, יש פחות זיהום כאשר חברות מיישמות סימביוזה תעשייתית, וזה נכון לכל ערך של הפרמטרים של המודל בתחומים

שהגדרנו. זאת מכיוון שהסימביוזה התעשייתית מקטינה את הזיהום כמעט לאפס, בהיותה טכנולוגיה אפקטיבית מאוד.

2. בתעשיות שבהן האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית [?] מספיק קטנה, ומחירם העולמי של תוצרי הלוואי PE מספיק גבוה, יישומה של סימביוזה תעשייתית מגדיל את הזיהום. במקרה זה מחד גיסא המחיר הגבוה של תוצרי הלוואי מתמרץ את החברות לייצר יותר ולזהם יותר, ומאידך גיסא הסימביוזה התעשייתית אינה מצליחה להקטין את הזיהום בשל האפקטיביות הנמוכה שלה.

במקרה 2 עידודה של סימביוזה תעשייתית, למשל באמצעות הגדלת הקנס על הזיהום, מבלי לשנות את הטכנולוגיות הקיימות, עלול להזיק בסופו של יום לקיימות. השפעה דומה תהיה גם לירידה במספר החברות בתעשייה. כאשר מספר החברות המתחרות בשוק קטן (פחות תחרות בשוק), כל חברה בודדת מרוויחה יותר, ולכן עולה הסיכוי שהחברות יעמדו בעלות הקבועה ויחליטו לאמץ סימביוזה תעשייתית. כלומר, ירידה במספר החברות בשוק עשויה להגדיל את השימוש בכלכלה מעגלית וכתוצאה מכך את הייצור ואת הפגיעה בקיימות. בנוסף, הירידה בתחרות אף תגרום לעליית מחירו של המוצר הסופי, ולכן הצרכנים ייפגעו לא רק מהעלייה בזיהום, אלא גם מעליית המחירים. מהתוצאות שלעיל עולה שהפרדיגמה שכלכלה מעגלית תמיד עדיפה על כלכלה ליניארית נכונה רק בתעשיות מסוימות ורק עבור טכנולוגיות מסוימות. זאת מכיוון שלסימביוזה תעשייתית השפעה חיובית על התחרותיות בענף, אך היא משפיעה בשני כיוונים מנוגדים על רמת הזיהום. נבהיר את ההשפעות המנוגדות של סימביוזה תעשייתית על רמת הזיהום באמצעות הסבר בשני שלבים. נמשיך עם דוגמה ונסיים בסימולציות להמחשת הממצאים. נתחיל מנקודת מוצא של כלכלה ליניארית, שבה סימביוזה תעשייתית אינה מיושמת. נפתור בנקודת המוצא את כל המשתנים בשיווי משקל כאמור לעיל. בשלב הראשון, ניישם סימביוזה תעשייתית ונבחן מה יקרה לזיהום אם רמת הייצור נותרת כפי שהייתה במצב המוצא. בהינתן רמת הייצור של מצב המוצא, ההשפעה הצפויה של יישום סימביוזה תעשייתית היא הקטנת הזיהום – עבור כל יחידה של המוצר חלק מתוצרי הלוואי הנפלטים בתהליך הייצור מופנים לסימביוזה תעשייתית (לשמש כחומרי גלם בתהליך ייצור אחר או למחזור), במקום לזהם את הסביבה. על כן, אם רמת הייצור לא הייתה משתנה, אזי רמת הזיהום הייתה קטנה. אולם כדי לבחון אם זאת אכן ההשפעה הכוללת של סימביוזה תעשייתית, יש לפתור שוב את שיווי המשקל במצב החדש, כלומר לאחר יישום של סימביוזה תעשייתית. זאת נעשה בשלב השני. ניפטר מההנחה שרמת הייצור נותרת כפי שהייתה ונפתור את שיווי המשקל במצב החדש. בשלב זה נגלה שסימביוזה תעשייתית עלולה לתמרץ את היצרנים להגדיל את היקף הייצור בשל הגידול ברווחיות שלהם. משום כך ההשפעה הכוללת של סימביוזה תעשייתית בשיווי משקל עלולה להיות הגדלה של היקף הזיהום. לכן חשוב להשוות את שיווי המשקל במצב המוצא מול שיווי המשקל במצב של יישום סימביוזה תעשייתית ולבחון מה קרה לזיהום.

למשל, נניח שלאחר שפירמה א' מתוודעת ליתרונותיה של כלכלה מעגלית בכנס שעורך משרד הכלכלה, היא יוצרת שיתוף פעולה עם פירמה ב', שקונה את תוצרי הלוואי שלה כחומרי גלם בתהליך הייצור. כתוצאה מכך הרווחים של פירמה א' גדלים, ומצבה משתפר להפליא. עתה היא מרוויחה לא רק ממכירת המוצר, אלא גם ממכירת תוצרי הלוואי שלו, ובנוסף היא אינה נקנסת יותר על הזיהום שהיא מייצרת. אם כן, כל עוד פירמה א' אינה משנה את הכמות

המיוצרת, גם הפסולת קטנה, מכיוון שחלקה מופנה לסימביוזה תעשייתית במקום לזהם את הסביבה. אולם, לאחר יישום סימביוזה תעשייתית, שיווי המשקל עשוי להשתנות. כלומר, בשל השיפור ברווחיות שלה, פירמה א' תרצה להגדיל את הכמות שהיא מייצרת. בנוסף, פירמות חדשות יראו כי טוב וירצו אף הן להיכנס לענף, וכך התחרותיות בענף תגבר. כלומר סימביוזה תעשייתית מייצרת רווחים נוספים לענף, ועל כן עשויה לתמרץ פירמות קיימות להגדיל ייצור ופירמות חדשות להיכנס לענף ולהגדיל עוד יותר את הייצור. להגדלת הייצור ולהגברת התחרותיות בענף השפעה חיובית על הצרכנים. זאת מכיוון שהגברת התחרותיות בענף מקטינה את האפשרות של כל פירמה להשפיע על המחיר ואת האפשרות של פירמות שונות לתאם ביניהן מחירים. משום כך, הירידה בריכוזיות בענף מביאה לירידת מחירי המוצר בשיווי משקל ולהגדלת עודף הצרכן, כלומר להגדלת ההפרש בין סך התועלת שהצרכן מפיק מהמוצר לבין הסכום אותו שילם. מנגד, כאמור, הגדלת הייצור עלולה לפגוע בקיימות, מכיוון שהיא עלולה להגדיל את הזיהום כאחוז מהייצור. הפירמה מייצרת יותר מהמוצר הרצוי בד בבד עם הגדלת השחרור של תוצרי לוואי בתהליך הייצור. כתוצאה מכך, תהליך ייצור שבו אחוז הפסולת גדול בשילוב עם אפקטיביות נמוכה של סימביוזה תעשייתית מביאים לכך שסימביוזה תעשייתית עלולה להחטיא את מטרתה – ולהגדיל את רמת הזיהום הנפלט בענף. במקרה זה, כדי ליישם סימביוזה תעשייתית נדרש שיפור טכנולוגי שיביא לכך שמימוש סימביוזה תעשייתית ישיג את המטרה של שיפור הקיימות.

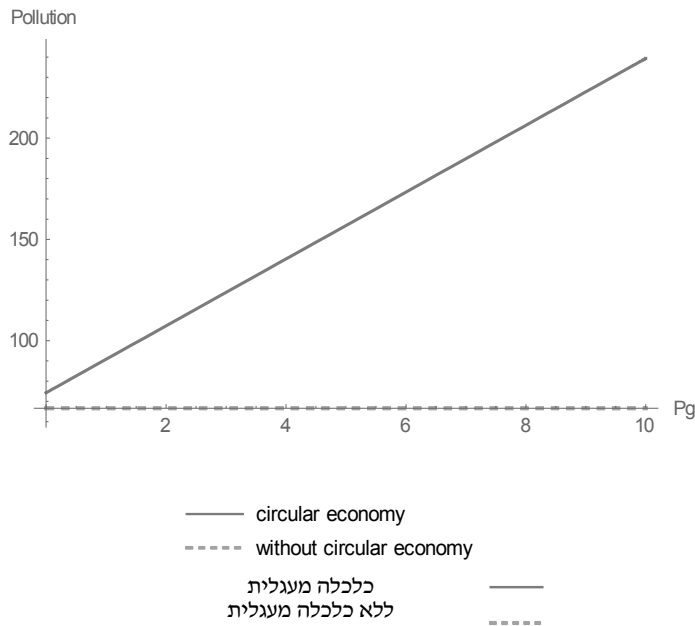
משום כך מסקנתנו העיקרית היא שבקביעת הפלטפורמה החוקית לכלכלה מעגלית יש להיזהר "לא לשפוך את התינוק עם המים" ונדרשים משנה זהירות ביישומה ושימת לב לחסמים טכנולוגיים. את המסקנה הזו העולה מהמודל נמיר להמלצות פעולה ליישום סימביוזה תעשייתית.

כדי להדגים את הממצאים שלנו ובמיוחד להמחיש את ההשפעות המנוגדות של סימביוזה תעשייתית ערכנו סימולציות של תרחישים שונים במודל בתוכנת Wolfram Mathematica בשיטה הבאה. הצבנו בנוסחאות של המודל פרמטרים שונים אקסוגניים של טכנולוגיית הייצור, ובהינתן הפרמטרים חזינו מה יקרה באותו ענף – האם סימביוזה תעשייתית תיושם? ואם כן, מה יהיו השלכותיה על הקיימות? בפרט התמקדנו בפרמטרים של רמת האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית וכן במחיר של הפסולת בשוק העולמי. חשוב לציין שכל נקודה בתרשימים משנה את ערכו של פרמטר אחד, זה שעל ציר ה- X , ceteris paribus, כלומר בהינתן כל הפרמטרים האחרים של המודל, כמו למשל רמת הקנס וההוצאות הקבועות. כל נקודה כזאת היא תוצאה של פתרון מחודש של שיווי המשקל בשוק ולכן מחשבת את ההשפעה הכוללת של שינוי הפרמטר על רמת הזיהום בשוק בשיווי משקל, תוך כדי שהיא מביאה בחשבון את כל ההשפעות המנוגדות שהזכרנו לעיל. נציג תוצאות נבחרות של הסימולציות שערכנו בתרשימים בפרק זה.

בשלושת התרשימים הבאים אנחנו משווים את רמת הזיהום (שלא ניתן למחזור או להשבה לתעשייה כחומר גלם, על הציר האנכי) תחת מדיניות המאפשרת ליישם כלכלה מעגלית (קו רציף) לעומת מדיניות שבה אין מיישמים כלכלה מעגלית (קו מקווקו). כדי להשוות טכנולוגיות שונות של סימביוזה תעשייתית, כל גרף מייצג רמה אחרת של אפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית, ² (או החלק מתוצרי הלוואי/הזיהום שניתן למחזור או לשימוש מחדש בתור חומר גלם בתעשייה), ובוחן עבור רמה זו כיצד שינוי המחיר העולמי של תוצרי הלוואי משפיע

על רמת הזיהום. בתרשים 1 הנחנו שהטכנולוגיה של הסימביוזה התעשייתית גרועה, כלומר אחוז הזיהום הניתן לשימוש מחדש הוא יחסית נמוך (1% מהזיהום), $\alpha = 0.01$; בתרשים 2 הנחנו אפקטיביות גבוהה של הסימביוזה התעשייתית (90% מהזיהום ניתן לשימוש מחדש, $\alpha = 0.9$); ובתרשים 3 הנחנו אפקטיביות בינונית של התהליך, $\alpha = 0.5$ ⁸⁴. להלן הממצאים.

תרשים 1: אימוץ סימביוזה תעשייתית עבור $\alpha = 0.01$



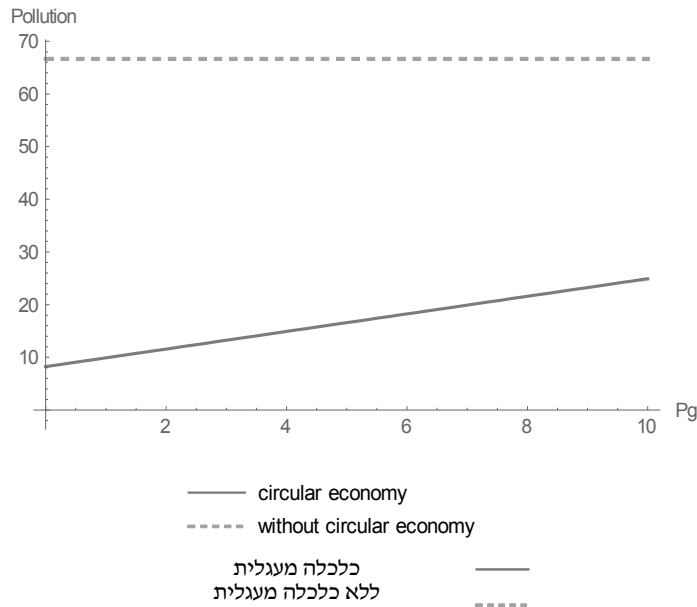
כאמור, תרשים 1 עוסק במקרה שבו הסימביוזה התעשייתית אינה אפקטיבית, $\alpha = 0$ נמוכה. ציר ה- Y מתאר את רמת הזיהום/פסולת שאינם ניתנים למחזור או שימוש מחדש. ניתן לראות שהגרף הכחול (יישום סימביוזה תעשייתית) גבוה מהגרף האדום המקווקו (ללא יישום סימביוזה תעשייתית). כלומר כאשר הטכנולוגיה של הסימביוזה התעשייתית גרועה, היא מגדילה את רמת הפסולת שאינה ניתנת למחזור או שימוש מחדש. הסיבה לכך, כפי שהסברנו בתחילת הפרק, היא שסימביוזה תעשייתית מעודדת ייצור בשל העלייה ברווחיות היצרנים ממכירתם של תוצרי הלוואי, ומשום כך עולה גם כמות הפסולת הנפלטת בייצור. כאשר הטכנולוגיה של הסימביוזה התעשייתית אינה אפקטיבית, פסולת זו כמעט ואינה ניתנת למחזור או שימוש מחדש, ולכן במקרה זה שיקולי קיימות ינחו אותנו שלא ליישם סימביוזה תעשייתית.

84 יתר הפרמטרים זהים בתרשימים 1-3: $c = d = 1, \alpha = 5, n = 100, b = 0.01, g = 0.5, c_g = 0$
בתרשים 4 הנחנו את הפרמטרים הבאים: $\alpha = 0.4, p_g = 5, c = d = 1, \alpha = 5, b = 0.01, g = 0.5, c_g = 0$

הציר האופקי מסמן רמות שונות (אקסוגניות) של המחיר בשוק העולמי לתוצרי הלוואי של הענף P_g . ככל שהמחירים של תוצרי הלוואי עולים בשוק, סימביוזה תעשייתית נעשית יותר רווחית לחברה ולכן היא מייצרת יותר. אולם העלייה בייצור מובילה להגדלת הזיהום (שאינו ממוחזר) ובאופן פרדוקסלי לפערים הולכים וגדלים ברמות הזיהום בהשוואה להיעדר יישום של סימביוזה תעשייתית, כפי שניתן לראות בתרשים.

מנגד, תרשים 2 מציג את המקרה ההפוך, אפקטיביות גבוהה של הסימביוזה התעשייתית (90% מהזיהום ניתנים לשימוש מחדש/מחזור, $\alpha = 0.9$). ניתן לראות בתרשים שכאשר הטכנולוגיה יעילה, יישום סימביוזה תעשייתית, כפי שמסומן על ידי הקו הרציף, מקטין את רמת הזיהום (שאינו ניתן למחזור) בהשוואה להיעדר יישום של סימביוזה תעשייתית, כפי שמסומן על ידי הקו המקווקו. תוצאה זו נכונה לכל רמת מחיר של תוצרי הלוואי והיא מדגימה את הכדאיות שבאימוץ של טכנולוגיה אפקטיבית של סימביוזה תעשייתית.

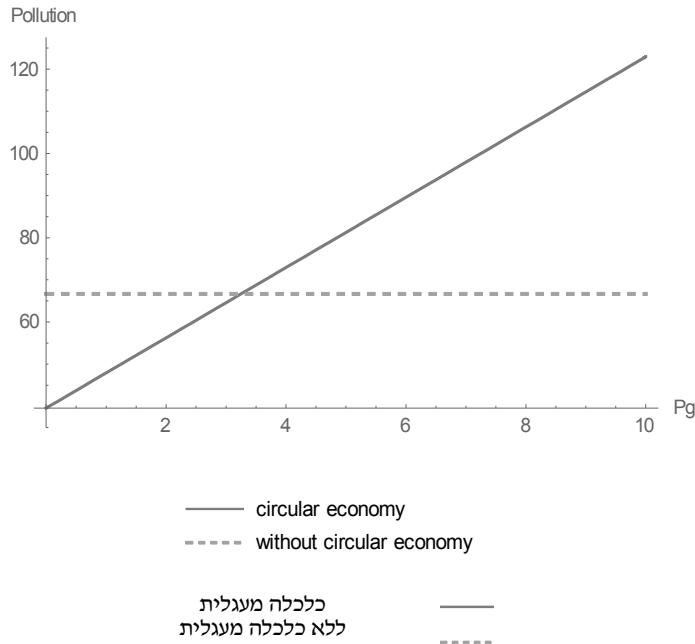
תרשים 2: אימוץ סימביוזה תעשייתית עבור $\alpha = 0.9$



כמו בתרשים 1, הציר האופקי מסמן רמות שונות של מחיר עולמי בשוק לתוצרי הלוואי של הענף. ככל שהמחירים של תוצרי הלוואי עולים, סימביוזה תעשייתית נעשית יותר רווחית לחברה ולכן היא מייצרת יותר. כתוצאה מכך ניתן לראות שעליות מחירי השוק של תוצרי הלוואי מובילה להגדלת הזיהום (שאינו ממוחזר) כאשר מיישמים סימביוזה תעשייתית, כלומר הגרף הרציף עולה עם העלייה במחיר תוצרי הלוואי. אולם ביחס לתרשים 1, השיפוע של הגרף הרציף הרבה יותר מתון. המשמעות היא שכתוצאה מעליות המחיר של תוצרי הלוואי בשוק, העלייה בזיהום אינה משמעותית, שהרי רוב הזיהום, 90%, ממוחזר.

בתרשים 3 הנחנו מצב ביניים, אפקטיביות בינונית של סימביוזה תעשייתית, $\alpha = 0.5$. תרשים זה ממחיש יותר מכל את ההשפעות המנוגדות של סימביוזה תעשייתית על הקיימות.

תרשים 3: אימוץ סימביוזה תעשייתית עבור $\alpha = 0.5$



ניתן לראות שבתעשיות שבהן האפקטיביות של סימביוזה תעשייתית ברמה בינונית, ההשפעה של יישום סימביוזה תעשייתית על הזיהום (שאינו ממוחזר) תלויה במחיר של תוצרי הלוואי בשוק העולמי. עבור מחיר נמוך של תוצרי הלוואי, יישום כלכלה מעגלית מקטין את הזיהום (שאינו ממוחזר), כלומר הקו הרציף נמוך מהקו המקווקו. אולם מחיר גבוה של תוצרי הלוואי הופך את התוצאה. מחיר גבוה של תוצרי הלוואי גורם להגברה מסיבית של הייצור בד בבד עם הגברה מסיבית של הזיהום, כך שבאופן פרדוקסלי אימוץ של סימביוזה תעשייתית מזיק לקיימות.

חשוב להדגיש שהפרמטרים של תהליך הייצור צפויים להראות מגמת שיפור על פני זמן עם הפיתוח של טכנולוגיות חדשות ידידותיות יותר לסביבה, כלומר האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית ⁸⁵ צפויה לגדול. למשל, ניקח את הדוגמה של תקני הפליטה, המצויים בסעיף 8 לחוק למניעת מפגעים, התשכ"א-1961.⁸⁵ תקן הפליטה הנקבע בביקור הראשון במפעלים ישנים הוא סלחני יותר ומתיר להשתמש בטכנולוגיה זולה וזמינה יחסית (BPT – Best Practical

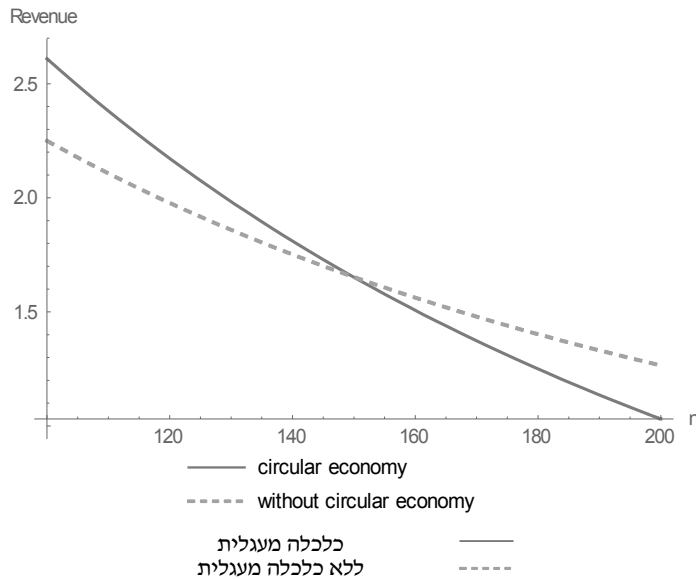
85 הסעיף מעניק לשר לאיכות הסביבה אפשרות לתת צווים אישיים למנהלי מפעלים: "8. (א) השר או מי שהשר מינהו לכך, רשאי להורות לאדם פלוני על הצעדים שעליו לנקוט למניעת כל הפרה של הסעיפים 2 או 3. 2. לא יגרום אדם לרעש חזק או בלתי סביר, מכל מקור שהוא, אם הוא מפריע, או עשוי להפריע, לאדם המצוי בקרבת מקום או לעוברים ושבים. 3. לא יגרום אדם לריח חזק או בלתי סביר, מכל מקור שהוא, אם הוא מפריע, או עשוי להפריע, לאדם המצוי בקרבת מקום או לעוברים ושבים."

Technology Best Available) BAT, המבטיחה שהמפעל ימשיך להיות רווחי. לאחר כמה שנים בדרך כלל משדרגים את התקנים ומחייבים את המפעלים הישנים להשתמש בטכנולוגיות BAT (Technology Best Available) – ממוצע בין הטכנולוגיות המזהמות יותר שברשות המפעלים לבין טכנולוגיות מתקדמות ויקרות יותר הקיימות במפעלים חדשים, תוך התחשבות בתהליך ההסתגלות שלהם לטכנולוגיות החדשות. דוגמה זו ממחישה שחסמים טכנולוגיים הולכים וקטנים עם הזמן, ולכן טכנולוגיות של סימביוזה תעשייתית נעשות כדאיות יותר ויותר ליישום.

על כן, ניתן לפרש את תרשימים 1–3 כמתארים את ההתפתחות הצפויה על פני זמן בכל ענף ככל ששיפורים טכנולוגיים מגדילים את האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית. תרשים 1 מתאר מצב התחלתי של אפקטיביות נמוכה. במצב זה סימביוזה תעשייתית מגדילה את הזיהום, ולכן לא כדאי ליישם אותה. יש להשקיע במחקר ופיתוח על מנת לפתח טכנולוגיות סימביוזה תעשייתית אפקטיביות יותר. תרשים 3 מתאר מצב שבו האפקטיביות גדלה לרמה בינונית, וכדאיות האימוץ של סימביוזה תעשייתית תלויה במחיר של תוצרי הלוואי בשוק העולמי. תרשים 2 מתאר מצב שבו טכנולוגיות הסימביוזה התעשייתית בענף כבר מספיק מתקדמות וידידותיות לסביבה, כך שאימוצן מקטין את הזיהום.

בתרשים 4 אנו מדגימים את ההשפעה של רמת התחרות בשוק על הכדאיות של היצרנים ליישם סימביוזה תעשייתית. אנחנו משווים את התקבולים של יצרן בודד בענף אם הוא מיישם סימביוזה תעשייתית, הגרף הרציף, או לא מיישם סימביוזה תעשייתית, הגרף המקווקו. על ציר ה-X מופיע המדד לרמת התחרות בשוק, מספר היצרנים בענף (n), ועל ציר ה-Y מופיעים תקבולי היצרן.

תרשים 4



ניתן לראות שככל שהשוק תחרותי יותר (מספר היצרנים עולה), תקבוליו של יצרן בודד יורדים בעקבות הירידה בנתח השוק שלו. תוצאה זו של קשר שלילי בין מספר היצרנים לבין תקבוליו של יצרן בודד היא מן המפורסמות בניתוח של שוק תחרותי, ונכונה בין אם הוא מיישם סימביוזה תעשייתית ובין אם לא. החידוש שלנו, כפי שעולה מהתרשים, הוא שכאשר מספר היצרנים בשוק מספיק גדול, תקבוליו של יצרן בודד, אם הוא מיישם סימביוזה תעשייתית, הגרף הרציף, נמוכים מתקבוליו אם הוא אינו מיישם סימביוזה תעשייתית, הגרף המקווקו. כלומר, כשיש הרבה יצרנים בשוק והתחרות גדלה, אימוץ כלכלה מעגלית נעשה פחות כדאי ליצרנים. זאת מכיוון שהצטרפות יצרנים חדשים לענף מקטינה את שולי הרווח של היצרנים הקיימים בענף. משום כך, היצרנים מתקשים לעמוד בהוצאה הקבועה הנדרשת לאימוץ סימביוזה תעשייתית. לסיכום, מבנה השוק משפיע על הכדאיות של היצרנים לאמץ כלכלה מעגלית. כאשר מספר היצרנים מספיק גדול, הם יעדיפו לא לאמץ טכנולוגיות של כלכלה מעגלית.

ח. דיון, מסקנות והמלצות

סימביוזה תעשייתית כתפיסה אוניברסלית הולכת ותופסת תאוצה בעולם כשיטה מבטיחה להתמודדות עם האתגרים של איכות הסביבה במשקים מודרניים ועם סופיות המשאבים בכדור הארץ. חוקרים ומקבלי החלטות במגזר הציבורי והעסקי מהללים אותה וטוענים שסימביוזה תעשייתית היא win-win לכולם, כפי שניתן היה להיווכח בוועידה לכלכלה מעגלית.⁸⁶ כלומר, הטענה היא שסימביוזה תעשייתית מייצרת ערך גם עבור התעשייה וגם עבור הסביבה. הציבור מרוויח שיפור בקיימות בשל הצמצום בזיהום, בפסולת ובצריכת משאבים, ובר כבוד התעשייה מרוויחה מהמסחר בתוצרי הלוואי, מחיסכון בעלויות טיפול ושינוע של פסולת (הטמנה, סילוק חומרים מסוכנים, שרפה או ייצוא הפסולת לחו"ל) ואינה מועדת לקנסות ולתביעות משפטיות. אולם למרות יתרונותיה הרבים, הממצאים שלנו בפרק הקודם מראים שלא בכל המקרים ולא בכל הענפים סימביוזה תעשייתית היא win-win, ולעיתים יישומה עלול לפגוע בקיימות, בפרט כאשר קיימים חסמים טכנולוגיים המקטינים את האפקטיביות של הסימביוזה התעשייתית. מסקנתנו העיקרית היא שבקביעת הפלטפורמה החוקית לכלכלה מעגלית יש להיזהר "לא לשפוך את התינוק עם המים". יש לבחון בקפדנות באילו תעשיות ניתן ליישם סימביוזה תעשייתית מוצלחת, ובאילו תעשיות סימביוזה תעשייתית תזיק לקיימות ויש לפתח טכנולוגיות חדשות טרם יישומה.

הממצאים שלנו מראים שסימביוזה תעשייתית מזיקה לקיימות במקרה של חסמים טכנולוגיים, כלומר כאשר טכנולוגיות הייצור מזהמות מאוד או אחוז קטן יחסית מתוצרי הלוואי ניתן למחזור או לשימוש מחדש בתור חומרי גלם. הסיבה היא שמכירת תוצרי הלוואי בשוק מגדילה את התמריץ של החברות לייצר ומשום כך גם את הפסולת, ובמקביל

86 מערכת infospot "התוכנית הלאומית לכלכלה מעגלית", לעיל ה"ש 20.

האפקטיביות הנמוכה של הסימביוזה התעשייתית אינה מאפשרת להיפטר באופן יעיל מהפסולת.

במקרים כאלה ההמלצה היא טרם היישום של סימביוזה תעשייתית לתמרץ מחקר ופיתוח של טכנולוגיות ידידותיות יותר לסביבה – טכנולוגיות שמקטינות זיהום ושימוש בלתי יעיל במשאבים לאורך תהליך הייצור. למשל, קידום טכנולוגיות שאינן מבוססות על דלקים פוסיליים, טכנולוגיות מחזור ושימוש בחומרים ממוחזרים בתעשיית הפלסטיק וכן עיצוב ותכנון מוצרים כך שיתאימו למחזור. טכנולוגיות אלה יהפכו את הסימביוזה התעשייתית למשתלמת ובסופו של יום ישפרו את הקיימות. בנוסף, כדי להבטיח את המשך השיפור הטכנולוגי של הסימביוזה התעשייתית על פני זמן, ניתן לחייב את החברות להשתמש לפחות בחלק מהרווחים מיישומה לפיתוח טכנולוגיות חדשות ואפקטיביות יותר. דרך נוספת לתמרץ פיתוח של טכנולוגיות חדשות היא לכפות סטנדרטים סביבתיים גבוהים יותר (כמו תקני פליטה להזרמת שפכים או כמו היעדים של האיחוד האירופי לפיקוח כלכלה מעגלית). בעוד שללא סימביוזה תעשייתית, ייתכן שהעומס הכלכלי על החברה היה מביא את הרגולטור להתפשר על טכנולוגיות של BPT (Best practical Technology), לאחר יישום סימביוזה תעשייתית, עם העלייה ברווחיות החברה, ניתן לכפות עליה אימוץ טכנולוגיות חדשניות לטיפול בזיהום, בפרט מעבר ל-BAT (Best available Technology), התקן המקובל בחקיקה הסביבתית, ואולי אפילו מעבר ל-BACT (Best available control technology), טכנולוגיה שעדיין נמצאת בשלבי פיתוח), כך שהיא עדיין תוכל לשמור על רווחיות וכדאיות כלכלית.

בהקשר זה משרד הכלכלה קידם כמה מיזמים בשנתיים האחרונות שהמשותף להם הוא הקטנת חסמים טכנולוגיים. בין היתר, משרד הכלכלה קידם את המיזמים הבאים:⁸⁷ מעבדת חדשנות קלינטק לתמיכה בסטארט אפים שמפתחים טכנולוגיות שאינן מבוססות על דלקים פוסיליים; אקסלרטור Green Up City לתמיכה בסטארט אפים של כלכלה מעגלית בתחומים עירוניים כמו ניהול פסולת, חקלאות עירונית, תחבורה ועוד; ו"מאגד פלסטיק circle" לעידוד פיתוח טכנולוגיות מחזור ושימוש בחומרים ממוחזרים בתעשיית הפלסטיק. בהיבט של כלי סיוע, התוכנית הלאומית תכלול גם מענקים לפיתוח והטמעה של טכנולוגיות, מוצרים ושירותים לפי עקרונות הכלכלה המעגלית תוך התייחסות למרכיבים של המוצר, לאורך חייו ולהשפעות הסביבתיות ומענק לעסקים קטנים ובינוניים לעיצוב ולפיתוח מוצרים שתומכים בכלכלה מעגלית. למשל, תכנון ועיצוב מוצרים כדי להתאימם למחזור או לשימוש חוזר, להגדיל את היקף התחולה של מרכיבים מתכלים ולהפחית את החומרים המסוכנים במוצרים (cradle to cradle).⁸⁸ עיצוב ברוח זו נועד להפחית את הפוטנציאל של זיהום סביבתי ולהפחית את השימוש בחומרי גלם.

87 ש.ם.

88 WILLIAM McDONOUGH & MICHAEL BRAUNGART, CRADLE TO CRADLE REMAKING THE WAY WE MAKE THINGS, NORTH POINT PRESS (2002).

מבלי לגרוע מהחשיבות של חסמים טכנולוגיים, חשוב להדגיש שסימביוזה תעשייתית עלולה לפסוח על הענף גם בשל חסמים אחרים, פסיכולוגיים התנהגותיים, חסמי אינפורמציה או חסמים רגולטוריים ובירוקרטיים. זאת למשל אם החברות אינן מודעות ליתרונות של סימביוזה תעשייתית או לשותפים פוטנציאליים שעשויים לקנות את תוצרי הלוואי, הן מתקשות באימוץ הלא-מוכר או כשהחקיקה בנושאי סטנדרטים של בטיחות וטיפול בפסולת אינה ברורה.

במקרים אלו תפקיד המדינה הוא "להניע את גלגלי התהליך". בפרט, המדינה צריכה לדאוג למדיניות סביבתית אחידה ויעילה התומכת בסימביוזה תעשייתית, לצמצם את משך הזמן של תהליכי הרישוי וההיתרים ולהבטיח תמריצים מספיקים להפנמת עלויות חיצוניות ולטיפול בפסולת – קרי, קנסות ואכיפתם. למשל, ללא היטל ההטמנה, שעומד כיום על כ-110 ש"ח לטון, לא הייתה היתכנות כלכלית לפרויקט ה-RDF. מנגד, האיסור להטמין פסולת אריוזת שהיה אמור לחול מ-1.1.2020 אינו נאכף. ללא תמריצים מספיקים החברות יחצינו (לא יביאו בחשבון) את הנזק לציבור (שימוש יתר במשאבים, פגיעה בקיימות ועלייה בתחלואה ותמותה) וימשיכו לזהם. עניין עראף משקף שינוי גישה של בית המשפט והכרה בכך שעבירות סביבתיות הן עבירות כלכליות עקיפות.⁸⁹ כדי לשלול את הכדאיות הכלכלית מהפרת החוק, בית המשפט העלה את הקנס וחייב הקמה של מתקני טיפול בזיהום.⁹⁰ כמה כלי מדיניות ננקטים היום בישראל להפחתת חסמי האינפורמציה והחסמים הפסיכולוגיים לאימוץ סימביוזה תעשייתית, כמו הסברה וסיוע ליצירת שיתופי פעולה ותיאום בין קונים למוכרים של תוצרי לוואי (matching).⁹¹ למשל, פיילוט סימביוזה תעשייתית, שתקציבו הממשלתי בשנת 2019 היה כ-5 מיליון ש"ח, נועד לעודד מסחר בתוצרי לוואי של תהליכי הייצור ופסולת תעשייתית. בנוסף, המרכז להתייעלות במשאבים הוא מרכז ידע ושרותי ייעוץ להתייעלות במשאבים,⁹² שמטרתו להעמיד לרשות התעשייה את חזית הידע העולמית בתחום ולפתח כלים לאיתור פוטנציאל ביצוע פרויקטים של הפחתה במקור והתייעלות במשאבים בתעשייה בישראל. הדגש הוא על מעבר מטיפול בזיהום לאחר היווצרו ("בקצה הצינור") לטיפול "מונע" במקור הזיהום. בהיבט הרגולציה, התוכנית הלאומית לכלכלה מעגלית עתידה לטפל בין היתר בהתאמת תקינה, למשל הסדרת תקן לשימוש בפסולת בניין ובחומרים ממוחזרים בתעשייה הבנייה, במקום כרייה ושימוש בקרקע; הסדרת ההגדרה החוקית של מפעל מחזור לצורך קבלת מענקים; הקצאות קרקע למתקני פסולת ומחזור על מנת לתת מענה להתנגדות של רשויות

89 ע"פ (מחוזי חי') 2633/02 מדינת ישראל נ' עראף (לא פורסם, 7.1.2003).
90 הקנס הגבוה מהווה איתות לשוק על החומרה של עבירות סביבתיות בעיני המחוקק. זאת במטרה שהשיקול הכלכלי יטה את הכף לכיוון של הפנמת העלויות החברתיות וטיפול של החברות בזיהום שהן יוצרות.

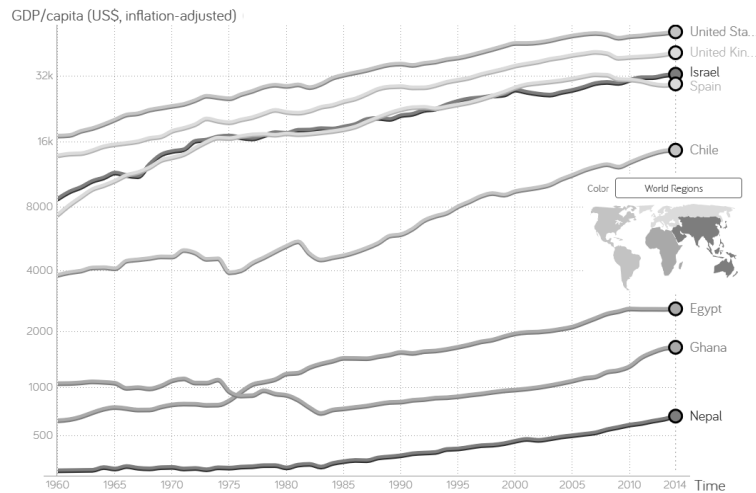
91 מערכת infospot "התוכנית הלאומית לכלכלה מעגלית", לעיל ה"ש 20.
92 המשרד להגנת הסביבה "מרכז ויץ לפיתוח בר קיימא נבחר להקים ולהפעיל את המרכז להתייעלות במשאבים בתעשייה, בתקציב ממשלתי של 51 מיליון שקלים" (9.9.2019) <https://bit.ly/3fZdR7U>.

מקומיות ותושבים למקם מתקנים אלה בקרבתם (NIMBY); וחקיקת חוק פסולת אחד שיגדיר את המושגים פסולת, סוף חיים, מחזור, תוצרי לוואי ובפרט מתי חומר גלם הופך לפסולת, איזו רגולציה חלה עליו כפסולת ומתי הפסולת הופכת בחזרה לחומר גלם, אם היא ממוחזרת. לסיכום, מיפוי החסמים הספציפיים לענפים שונים ולמפעלים שונים יאפשר התאמת ה"טיפול" הנכון לכל סיטואציה ויישום יעיל של סימביוזה תעשייתית מוצלחת. חשוב לציין שבמקרים של סימביוזה תעשייתית גלובלית, כאשר יישום סימביוזה תעשייתית מערב כמה קהילות, אזורים או מדינות, עולות שאלות שנויות במחלוקת הקשורות בצדק אקלימי, הפנמת הנזק לציבור במדינה אחת על ידי מדינה אחרת (NIMBY), פרוטקציוניזם במסווה של דאגה לקיימות וכן בעיות של תיאום בין מדינות, כפי שראינו בדוגמה של מחזור מכשירי אלקטרוניקה.

נספח – גרפים

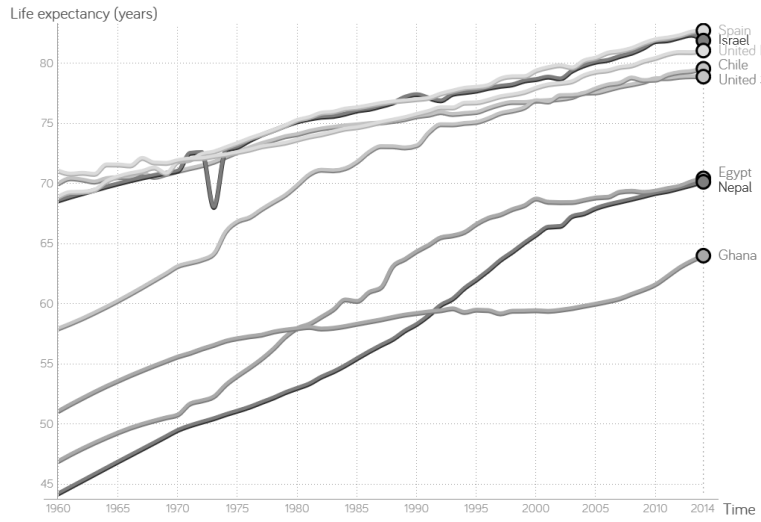
מקור: עיבוד נתונים מאתר <https://bit.ly/351aLtM>, Gap Minder

גרף 1: התוצר לנפש על פני זמן במדינות נבחרות



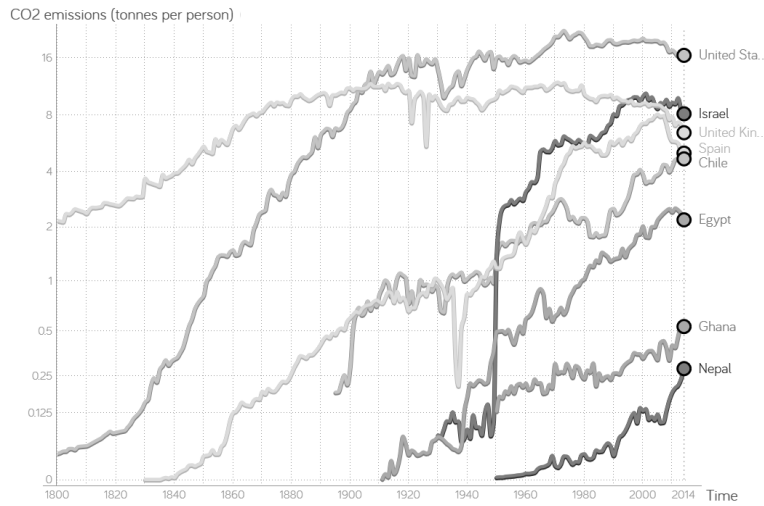
התוצר לנפש (gross domestic product) מחולק ברמת האוכלוסייה באמצע השנה במחירי 2010 (דולרים).

גרף 2: תוחלת חיים על פני זמן במדינות נבחרות



תוחלת החיים מוגדרת כמספר השנים הממוצע שילד שנולד באותה שנה צפוי לחיות אם שיעורי התמותה יישארו ברמה שבה הם מצויים היום.

גרף 3: פליטות פחמן דו-חמצני מדלק פוסילי על פני זמן במדינות נבחרות



גרף 4 : פליטות פחמן דו-חמצני מדלק פוסילי במדינות ה-OECD

