

ביקוש למי השקיה קולחים ושפירים: אמידה א-פרמטרית תחת מחירי מדרגות

עבודת-גמר

מוגשת לפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית

האוניברסיטה העברית בירושלים

**לשם קבלת תואר
'מוסמך למדעי החקלאות'**

ע"י

סער פרדו

Demand for Fresh and Non-Fresh Irrigation Water: Nonparametric Estimation Under Increasing Block Tariffs

M.Sc. Thesis

Submitted to the Robert H. Smith Faculty of
Agriculture, Food & Environment

The Hebrew University of Jerusalem

**For the Degree
'Master of Sciences'**

By
Saar Pardo

March 2025

Rehovot

עבודה זו נעשתה בהדרכת:

פרופסור, עדו קן

המחלקה לכלכלת סביבה וניהול.

הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית,
האוניברסיטה העברית בירושלים.

פרופסור, ישראל פינקלשטיין

המחלקה לכלכלת סביבה וניהול.

הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית,
האוניברסיטה העברית בירושלים.

דוקטור, אוהד רזה

המחלקה לכלכלת סביבה וניהול.

הפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ע"ש רוברט ה. סמית,
האוניברסיטה העברית בירושלים.

תקציר

הגידול בביקוש למים שפירים בישראל, לצד הצורך בהגברת התפוקה החקלאית וביטחון המזון הלאומי, מגבירים את הביקוש למי קולחים כמקור אלטרנטיבי ומדגישים את החשיבות שבהבנת דפוסי הביקוש למקור מים זה. מחקר זה מתמקד בביתוח נפרד של הביקוש למי שפדן כמקור מי קולחים ושל הביקוש למים שפירים להשקיה תחת מבנה מחירים מדורג. באמצעות גישה א-פרמטרית ושימוש במשתנה הפרש, המוגדר כסובסידיה הגלומה במדרגות המחיר, נותחו נתוני פאנל של צריכת מים על ידי 211 יישובים חקלאיים בשנים 2015-2022. הממצאים מצביעים על גמישות ביקוש נמוכה למחיר שפדן (-0.23) וגבוהה למכסה (0.86), בעוד שהביקוש למים שפירים מציג גמישויות הפוכות מבחינת רמותיהן היחסיות (0.65 ו-0.25 בהתאמה). המחקר צופה גידול של 123% בביקוש המצרפי למי שפדן עד שנת 2050, בהשוואה לשנת 2020 ויכולת התאמה טובה של הביקוש להיצע המצרפי הצפוי. מסקנות המחקר מדגישות את קביעת המכסות ככלי המרכזי להשפעה על הביקוש לשפדן. בנוסף, גמישות המחיר הנמוכה מעידה על כך שהתועלת הכלכלית מקוב שפדן עולה על העלות שלו לצרכן החקלאי הממוצע.

Abstract

The growing demand for freshwater in Israel, alongside the need to increase agricultural output and national food security, heightens the demand for treated wastewater as an alternative source. This trend underscores the importance of understanding the demand patterns for this water source. This research focuses on separate analyses of the demand for Shafdan treated wastewater and the demand for freshwater for irrigation under a tiered pricing structure. Using a non-parametric approach and differential variable, defined as the subsidy embedded in the price tiers, panel data of water consumption by 211 agricultural settlements during 2015-2022 were analyzed. The findings indicate low price elasticity of demand for Shafdan water (-0.23) and high quota elasticity (0.86), while freshwater demand exhibits opposite elasticities in terms of their relative levels (-0.65 and 0.25 respectively). The research projects a 123% increase in the aggregate demand for Shafdan water by 2050, compared to 2020, with a good match between projected demand and expected aggregate supply. The research conclusions emphasize quota setting as the central tool for influencing Shafdan water demand. Additionally, the low price elasticity indicates that the economic benefit from a cubic meter of Shafdan water exceeds its cost for the average agricultural consumer.

תוכן עניינים

6.....	הקדמה
6.....	אתגרי משק המים בישראל
6.....	ניהול משק המים
6.....	מנגנון תמחור המים בחקלאות
8.....	אמידת ביקוש תחת מבנה מחירים מדורג
9.....	שפדן כמקור קולחים
9.....	השפעת הסובסידיה על הביקוש
10.....	מטרות המחקר וחשיבותו
11.....	מתודולוגיה
11.....	סובסידיה
12.....	צריכה אופטימלית
13.....	אסטרטגיית אמידה
14.....	נתונים
15.....	סטטיסטיקה תיאורית
18.....	תוצאות
18.....	אמידת מודל של אפקטים קבועים
20.....	מדד טיב התאמה
21.....	מובהקות סטטיסטית להשפעות מחיר ומכסה
23.....	סימולציות לצריכה מצרפית בשפדן
25.....	רגישות הביקוש בשפדן למנגנון המחירים
26.....	רווחת הצרכנים
28.....	דיון
28.....	ביקוש למי שפדן
29.....	ביקוש למים שפירים
29.....	השפעות מזג אוויר ומשקעים
31.....	מגבלות והשלכות המחקר
32.....	מסקנות
33.....	מקורות
36.....	נספח א' – משתני הסובסידיה ואיברי הפולינום

הקדמה

אתגרי משק המים בישראל

אספקת מים לחקלאות בישראל היא אתגר מורכב, הנובע הן ממגבלה על מקורות המים הטבעיים בשל האקלים הצחיח למחצה, והן מגידול מתמיד בביקוש למים שפירים לשימוש ביתי בעקבות גידול באוכלוסייה. האיזון במשק המים נעשה מורכב עוד יותר לאור השאיפה להגברת ביטחון המזון הלאומי, כפי שמשתמע מהחלטת ממשלה 2343 מנובמבר 2024. על כן, ישנו צורך ממשי ביציבות באספקת המים לחקלאות. במקביל ללחצים ההולכים וגוברים על מקורות המים, נוצר אתגר סביבתי נוסף – גידול מתמשך בכמות השפכים המיוצרים עם התרחבות האוכלוסייה. ללא פתרון מתאים, שפכים אלו עלולים להכביד על תשתיות הטיפול במים ולפגוע בסביבה. בהתאם לכך, שימוש במי קולחין להשקיה מציע פתרון כפול: הוא מספק מקור מים יציב לחקלאות, ובמקביל תורם לניהול בר-קיימא של השפכים. למעשה, חקלאים בישראל עושים שימוש במים ממוחזרים להשקיה כבר למעלה משלושה עשורים (Finkelshtain et al., 2020), וכך הופכים פסולת למשאב נצרך, המסייע הן להתמודדות עם מגבלות ההיצע במשק המים והן לצמצום ההשפעה הסביבתית של השפכים. טכנולוגיות טיהור שפכים מאפשרות שימוש חקלאי במגוון מקורות מים שאינם שפירים, כולל מי קולחים באיכויות שונות (טיהור שניוני ושלישוני), מי שפדן ומים מליחים. מקורות אלו נבדלים זה מזה ברמת המליחות, באיכות, בעלות ההפקה ובעלות לצרכן. זמינות מקורות אלו לחקלאים תלויה במידה רבה ברישוי מתאים ובקרבה לאותם מקורות השבה והפקה (IWA).

ניהול משק המים

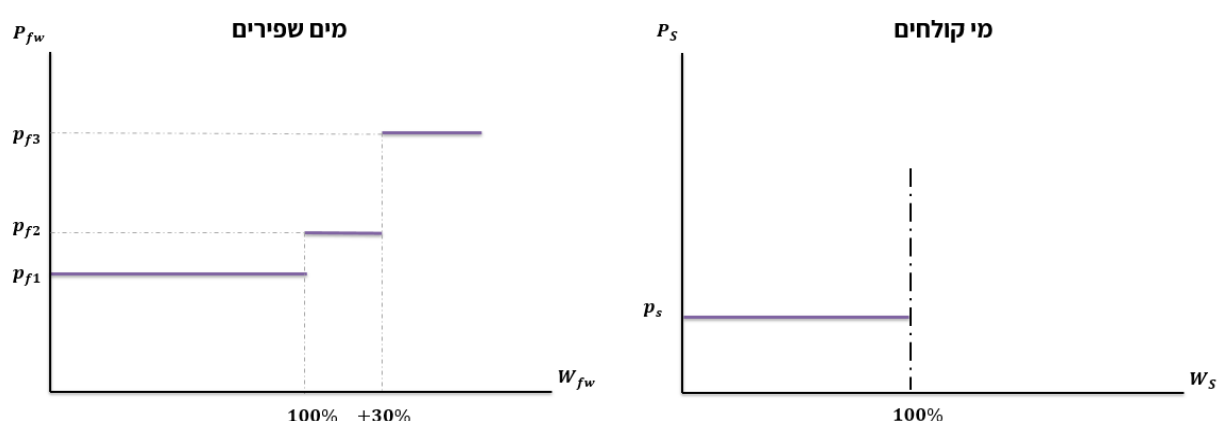
מחסור במקורות מים טבעיים מחייב ניהול קפדני להבטחת ניצול בר-קיימא של המשאב. בישראל, האחריות על ניהול משק המים מעוגנת בחוק המים (IMNI, 1959), הקובע שכל מקורות המים הם קניין הציבור. רשות המים, כגוף ממשלתי, מופקדת על תכנון מדיניות המים ועל הפיקוח והרגולציה בתחום, בעוד שחברת "מקורות" – חברה ממשלתית, אחראית על הפקת המים, הובלתם, גביית התשלום ופינוי השפכים. הניהול בפועל מתאפשר באמצעות מדידה ותייעוד של כמויות השימוש, לצד הפקת רישיונות שאיבה, קביעת מכסות צריכה שנתיות והגדרת מנגנון תמחור קבוע. צריכת המים לחקלאות כפופה למכסות שנתיות ליישובים חקלאיים, המבוססות על תקנות עבר (IMNI, 2018). תקנות אלו מהוות את הבסיס לקביעת כמות המים המוקצית בכל שנה, כאשר שינויים במלאי המים השפירים או רצף של מספר שנים ברמת ניצול נמוכה באופן חריג עשויים להשפיע על שינוי גובה המכסה השנתית. כתוצאה מכך, נוצרת הטרוגניות גבוהה בין היישובים החקלאיים בכמות המים המוקצית לכל ישוב, אשר מסייעת באמידת הביקוש למים.

מנגנון תמחור המים בחקלאות

מנגנון התמחור של רשות המים הינו מנגנון דיפרנציאלי. מי השקיה שפירים כפופים למבנה תמחור מדורג עולה. שיטת התמחור דיפרנציאלית נפוצה במדינות מפותחות ומתפתחות בעיקר בתמחור מוצרי בסיס ביתיים כמו מים וחשמל (Boland & Whittington, 1998). מרבית המדינות המפותחות מנהלות את משק המים שלהן בתמחור משתנה על פי צריכה או לפי אזור. בישראל מנגנון התמחור הינו מדורג ומיושם במגזר העירוני ובמגזר החקלאי

(Rothenberg & Zadik, 2020). מטרת התמחיר המדורג הינן מחד ניצול אחראי של משאב במחסור ומאידך להבטיח נגישות הוגנת למוצר חיוני (Dahan & Nisan, 2007). מדיניות רשות המים לגבי תמחור מי השקיה שפירים לשימוש חקלאי כוללת הלכה למעשה שלוש מדרגות (איור 1). לפי תקנות המים, הצריכה בתעריף הבסיס (p_{f1}) מוגבלת על ידי מכסת הצריכה (100%), הצריכה בתעריף שני (p_{f2}) מוגדרת בתקנות המים כחריגה מהמכסה השנתית עד לרמה של 30% מהמכסה, וצריכה מעבר לתוספת מחויבת במחיר המדרגה השלישית (p_{f3}). לעומת זאת, מי השפד"ן מתומחרים במחיר אחיד וכפופים למכסה שנתית קשיחה. יצוין כי החל משנת 2018, רמת הצריכה המרבית בתעריף שני עודכנה לכדי 10% ממכסת הצריכה השנתית.

איור 1: מערכת מחירי המים בישראל - תמחור מדורג למים שפירים משמאל, ותמחור אחיד ומכסה קשיחה למי קולחים מימין



תעריפי המים השפירים חוו שינויים תכופים במהלך העשורים האחרונים. בתקופה שקדמה לשנת 2008, מדיניות של סבסוד ישיר מתקציב המדינה השתקפה ע"י תעריפים זולים (Kislev, 2011). משנת 2008, העלאה הדרגתית של תעריפי המים נבעה מהצורך באיזון בין הכנסות חברת מקורות לעלויות ההפקה הכוללות, כאשר המגזר החקלאי לא נתמך יותר על ידי קופת המדינה אך מסובסד באופן צולב ע"י תעריפי הצריכה הביתית. יישום המלצות ועדת ביין (2010) הוביל לייקור נוסף והתאמת תעריפי החקלאות כך שישקפו את העלות הריאלית של אספקת המים לחקלאות. בשנת 2017, במסגרת תיקון 27 לחוק המים ותחת עקרונות של יעילות הקצאה בין אזורים גיאוגרפים, עודכנו תעריפי המים. הפעם השינוי העיקרי היה הוזלה חדה של תעריף הבסיס מ-2.5 ש"ל למ"ק ל-1.86 ש"ל למ"ק. התעריף החדש נקבע כמחיר אחיד לכל החקלאים (למעט צרכנים נעדרי חלופה לשפירים בצפון ובשומרון), ללא תלות במיקומם הגיאוגרפי או ברישיונות ההפקה שברשותם (IMNI, 1959). שינויים תכופים אלו במנגנון התמחור מספקים מסגרת של "ניסוי טבעי" היוצר שונות במחירים ומאפשר אמידה של הביקוש למים שפירים וקולחים.

אמידת ביקוש תחת מבנה מחירים מדורג

אמידת ביקוש בתנאי תמחור מדורג מציבה שני אתגרים מרכזיים. האתגר הראשון הוא אנדוגניות המחיר, המתבטאת בשני היבטים: ראשית, הקשר הסימולטני בין רמת הצריכה למחיר השולי יוצר מתאם בין המחיר למאפיינים בלתי נצפים של הצרכן שהינם חלק משגיאת האמידה; שנית, בשל אי-רציפות עקומת ההיצע במבנה תמחור מדורג, שינויים מזעריים בצריכה בסביבת המכסה של מדרגה כלשהי עשויים להוביל לשינוי גדול במחיר השולי. האתגר השני באמידה נוגע לאפקט ההכנסה הגלום במבנה תמחור זה. אפקט זה נובע מהאפשרות הניתנת לחקלאי לצרוך כמות מסוימת במחיר בסיס נמוך, כאשר הפער בין תעריף הבסיס לתעריפים במדרגות הגבוהות יותר מהווה למעשה סבסוד. סבסוד זה עלול להשפיע באופן עקיף על הביקוש ולהטות את השפעות המחיר והמכסה.

התמודדות עם אתגרים אלו הובילה להתפתחות מגוון גישות אמידה בספרות הכלכלית. Burtless & Hausman (1978) פיתחו מודל נראות מקסימלית בהקשר של בחירת שעות עבודה תחת מדרגות מס. מודל זה הפך לכלי מרכזי באמידת ביקוש עירוני למוצרי בסיס תחת מחירים מדורגים (Moffitt, 1986; Hewitt & Hanemann, 1995; Olmstead, 2009). אולם גישת הנראות המקסימלית נשענת על הנחות לגבי התפלגות טעויות המדידה, וכרוכה באתגרי אמידה טכניים. גישה נוספת שפותחה על ידי Nordin (1976), מתבססת על משתנה הפרש (ההפרש בין מדרגות המחיר מוכפל במכסת המדרגה) ככלי להתמודדות עם האנדוגניות במחיר, ויושמה על ידי Billings & Agthe (1980) באמידת ביקוש למים. כלכלנים אחרים אמדו את הביקוש לצריכה ביתית של מים בעזרת משתני עזר כמו מאפיינים התנהגותיים וימי גשם (Nauges & Thomas, 2000; Martinez-Espineira, 2002). נוסף לגישות אלו, Blomquist & Newey (2000) היו הראשונים לאמוד מודל בחירה א-פרמטרי. גישה זו יושמה על ידי Nauges & Blundell (2001) באמידת ביקוש ביתי למים תוך הצגת השוואה בין הגישות השונות. Nauges & Blundell מצאו שנוסף על היות הגישה הא-פרמטרית פשוטה לביצוע מבחינה טכנית, היא בעלת יכולות ניבוי גבוהות בהשוואה לשאר שיטות האמידה. השוואת שיטות אמידה באה לידי ביטוי גם בעבודתה של Olmstead (2009), שהראתה שאין בהכרח עדיפות למודל נראות מקסימלית על פני מודל פשוט עם משתנה עזר באמידת ביקוש בתנאי מחירי מדרגות.

מחקרים על הביקוש הביתי למים בישראל עסקו בשאלת כלכלת מחירי המדרגות. Dahan & Nissan (2007) בחנו את השפעות תמחור המים באמצעות השוואה בין מודל נראות מקסימלית לבין מודל דו-שלבי שהתבסס על משתנה הפרש המדרגה והכנסת משק הבית. מחקר נוסף של Bar-Shira et al. (2007) יישם מודל נראות מקסימלית על נתוני פאנל מ-97 רשויות מקומיות בישראל. בשני המחקרים הללו נמצא ביקוש קשיח למחיר והשפעת גובה המדרגה הראשונה על הוצאתם של משקי בית מעוטי ההכנסה. בהקשר החקלאי בישראל, מודל הנראות המקסימלית יושם לראשונה על ידי Bar-Shira et al. (2006), לאמידת הביקוש למי השקיה שפירים כחלק מבחינת יעילות מבנה התמחור המדורג. המודל הורחב על ידי Finkelshtain et al. (2020), באמידת ביקוש חקלאי למים באיכויות שונות (שפירים ולא שפירים). עם זאת, למיטב ידיעתנו, טרם נעשה שימוש בגישת האמידה הא-פרמטרית

לאמידת הביקוש החקלאי למים בישראל. יתרה מכך, טרם נחקר באמצעות גישה זו, ביקוש חקלאי לשני סוגי מים הנבדלים ביניהם ברמות האיכות.

שפדן כמקור קולחים

מבין מקורות המים שאינם שפירים, מי השפדן מהווים מקרה בוחן איכותי לחקר הביקוש החקלאי למים שוליים הודות למספר מאפיינים ייחודיים. מתקן השפדן, הממוקם במטרופולין תל אביב, עושה שימוש בטכנולוגיית סינון חולי על ידי החדרה של מים לאקוויפר. שיטה זו מאפשרת ייצור קולחים באיכות גבוהה מטיהור שלישוני (Goren et al., 2014). למתקן יכולת הספק שנתית של כ-150 מיליון מטרים מעוקבים המיועדים להשקיה חקלאית. נתון זה רלוונטי בעיקר לשנים האחרונות, שבהן תנודתיות בכמות השפכים המסופקת למתקן וביכולות הסינון יצרו שינויים בהיקף הקולחים המופק בכל שנה (Mekorot, 2023). מי השפדן מתומחרים במחיר ייחודי, הנבדל מזה של קולחים המיוצרים על ידי שאר מפעלי הטיהור בארץ, כאשר בתקופת המחקר, מחיר השפדן היה גבוה בכ-4% בממוצע ממחיר הקולחים האחרים (IWA). היבט ייחודי נוסף של השפדן טמון במסגרת המוסדית שבה הוא פועל. בשונה ממקורות מים מושבים אחרים, השפדן מתנהל תחת מערכת מכסות שנתיות קשיחות, כאשר במקרה של חריגה ממכסת השפדן, מסופקים לחקלאי מים שפירים באותה מערכת הולכה. החיוב בגין צריכת המים השפירים של כל משתמש נעשה בהתאם למערכת מחירי המדרגות המתוארת באיור 1 (Nisenbaum, IWA). בשנים האחרונות נתוני רשות המים מצביעים על מגמת התייקרות עקבית בתעריפי השפדן, בעוד שהתעריף הבסיסי של המים השפירים נותר יציב יחסית. מגמת ההתייקרות מחד והוזלת המים השפירים הארעית במסגרת תיקון 27 מאידך, יצרו שונות משמעותית ביחסי מחירי המקורות במהלך התקופה הנבחרת במחקר זה, עם טווח יחסי מחיר-שפדן/מחיר-שפירים של 1.2-2.2.

התכנון להרחיב את הספק השפדן כחלק מתוכנית הקולחים המתגבשת לתקופה של עד 2050, לצד מגבלה טבעית הקיימת בשיטת הסינון של החדרה-שאיבה לאקוויפר, צפויים להביא בטווח הארוך לשינויים תפעוליים ולייקור עלות הפקת מי השפדן. מאידך, לנוהל תמיכה חדש של משרד החקלאות, מבוסס על הורדת תעריפי המים המושבים בהתאם לעלות הנחסכת מאי הזרמת מי הביוב המטופלים לים. החל מ-2024 חקלאים צורכי שפדן וקולחים זכאים לתמיכה זו (IMA, 2024). על אף שמחקר קודם בחן את תגובת החקלאים לשינויים במחירי מים ממקורות שונים, טרם נבחנה באופן מקיף תגובת הביקוש לשינויי מחיר בהתייחס למי שפדן באופן ספציפי. נוכח שינויים במחיר השפדן בשנים האחרונות ואלו שעתידיים לבוא, זיהוי מאפייני הביקוש למי שפדן עשוי לסייע בקביעת מדיניות תמחור מתאימה.

השפעת הסובסידיה על הביקוש

מקובל לחשוב כי הביקוש החקלאי מונע ממיקסום רווחים ואינו מכיל השפעות הכנסה, בשונה מהביקוש הביתי אשר תלוי במגבלת התקציב של הצרכן. למרות זאת, ישנם כמה מנגנונים כלכליים דרכם ניתן להסביר את הקשר בין הכנסת החקלאי לביקוש שלו למים. הראשון הוא השפעת מבנה המחיר המדורג על שיווי המשקל במשק החקלאי בטווח הארוך (Bar-Shira & Finkelshtain, 2000). בהינתן כניסה ויציאה חופשית של צרכני מים

חקלאיים, מבנה מחירים מדורג, שבו מחיר הבסיס נמוך מעלות המים השולית, עשוי להשפיע על הכניסה של חקלאים לענף (כלומר, לקבוצת החקלאים המשקים את שדותיהם), כמו גם גידול בתפוקה החקלאית המצרפית ושחיקת מחיר התוצרת החקלאית בטווח הארוך. מנגנון שני הוא מרכיב אי הוודאות בחקלאות והקשר בין שנאת סיכון להכנסה. ישנו קשר שלילי בין רווחת החקלאי ובין מידת שנאת הסיכון האבסולוטית שלו (Sandmo, 1971; Bar-Shira, 1997). אפקט ההכנסה ניכר גם בממצאים של (Binswanger & Sillers, 1983), אשר הראו שבהיעדר מגבלת אשראי, חקלאים יהיו נכונים יותר לחלוק עם גורם מממן את הסיכון ולהשקיע בתשומות. לפיכך, ניתן להתייחס לצרכן המים החקלאי כאל צרכן הפועל להשאת רווחיו בכפוף למגבלת תקציב המשפיעה על צריכת המים ושאר גורמי הייצור. יש לציין שכיוון השפעת שינויי ההכנסה על צריכת המים אינה ודאית. למשל, גידול בהכנסה יכול להביא להגדלת כמות המים המבוקשת כתוצאה מהחלטה להשקיע במערכות השקיה לצורך הגדלת שטחי גידולי שלחין (עם השקיה) על חשבון שטחי גידולי הבעל (ללא השקיה). כלומר, השפעה על השוליים האקסטנסיביים. ע"פ הלמ"ס, הקצאת שטחי הגד"ש הכוללת בין חקלאות בעל לשלחין תנודתית על פני שנים (CBS). תנודתיות זו עשויה להיות מושפעת מהסובסידיה הגלומה במחירי המדרגות. ייתכן והגידול בהכנסה עשוי להביא לצמצום הכמות המבוקשת בגין אימוץ טכנולוגיות המייעלות את השימוש במים, כגון החלפת מערכות המטרה בטפטוף והתקנת רשתות הצללה. כלומר, השפעה על שוליים אינטנסיביים.

מטרות המחקר וחשיבותו

שינויים תכופים במבנה תמחור המים השפירים לצד המאפיינים הייחודיים של מי השפדן מספקים הזדמנות לבחון את הביקוש למקורות אלו בחקלאות על בסיס מסד נתוני צריכה-הקצאה עדכני. אמנם סוגיית הביקוש למי השקיה כבר נדונה במחקרי עבר אך אלו נסמכו על נתוני צריכה היסטוריים. מחקר זה מאפשר בחינה מחדש של נתוני צריכה והקצאה בעשור האחרון, אשר התאפיין בשינויי מדיניות, אישורי תוכניות לפיתוח תשתיות ושדרוג יכולות הטיהור של המים המושבים. בעוד שמחקר קודם התמקד בביתוח מצרפי של כלל המים השוליים, מחקר זה מבחין בין מקורות המים השונים ומתמקד באמידת ביקוש לשני סוגי מים – שפירים ושפדן, באופן נפרד. למחקר שלוש מטרות מרכזיות: ראשית, זיהוי גמישויות הביקוש בהתייחס למחיר, למכסה ולאפקט ההכנסה הגלום בסובסידיה עבור כל מקור מים; שנית, כימות השפעות תנאי האקלים על דפוסי הביקוש למקורות המים השונים; שלישית, עריכת סימולציות לביקוש למי שפדן בהתאם לתכנית הרחבת ההיצע. לצורך השגת מטרות אלו, אנו מיישמים גישה א-פרמטרית לאמידת הביקוש תוך שימוש בנתוני פאנל של צריכה והקצאת מים ברמת היישוב החקלאי בשנים 2015-2022. המדגם כולל 211 קיבוצים ומושבים הפרוסים באזור המרכז והדרום. שילוב הסובסידיה כמשתנה מסביר באמידת הביקוש למים לשימוש חקלאי מהווה חידוש מתודולוגי, בעזרתנו ניתן ביטוי להשפעת הכנסת החקלאי על החלטותיו לגבי השימוש במים. עבודה זו תוכל להוות תשתית מחקרית אשר תסייע למקבלי ההחלטות בקידום מדיניות וניהול בר-קיימא של משק המים לחקלאות.

מתודולוגיה

בהינתן משק חקלאי קטן עם קבוצת חקלאים M , לכל חקלאי ניתנת גישה למקור מי השקיה שפירים (f). בתוך אותה קבוצת חקלאים, ישנה תת-קבוצה $I \subseteq M$ של חקלאים בעלי גישה גם למי שפדן (s) כמקור השקיה אלטרנטיבי. הגישה למקור זה היא אקסוגנית ונקבעת בהתאם למיקום גיאוגרפי ובנוכחות מערכת הובלה שאיננה תלויה בחקלאים. באופן משלים, החקלאים ללא גישה לשפדן מיוצגים על ידי $J = M - I$. נסמל את הצריכה של כל צרכן $j \in J$ על ידי w_j^f , וצריכתו של צרכן בעל גישה לשני מקורות המים $i \in I$ מיוצגת על ידי w_i^s, w_i^f . תעריפי מקורות המים השונים מסומנים ב- p , כאשר תעריף השפדן המתועד בספרי התעריפים, תמיד נמוך מתעריף הבסיס לשפירים. מי השקיה שפירים מתומחרים במערכת מדורגת עולה, נסמן את תעריף השפירים במדרגה k ב- $\{1, 2, 3\}$ p^{fk} . מערכת יחסי המחירים היא:

$$p^s < p^{f1} < p^{f2} < p^{f3}$$

באופן תואם, נסמל את רמות המים השפירים במדרגה k של צרכן i על ידי w_i^{fk} . כאמור, הצריכות במדרגות הראשונה והשנייה כפופות למגבלות המכסות האישיות של כל צרכן, שיסומלו כ- $q_i^{f1}; q_i^{f2}$. מגבלת הצריכה בכל מדרגה k היא אם כן $w_i^{fk} \leq q_i^{fk}, k \in \{1, 2\}$. מכסת השפדן השנתית לצרכני שפדן, q_i^s , מהווה מגבלה קשיחה, כלומר סך מי השפדן הנצרכים לא יעלה על גובה המכסה האישית של כל צרכן, $w_i^s \leq q_i^s$.

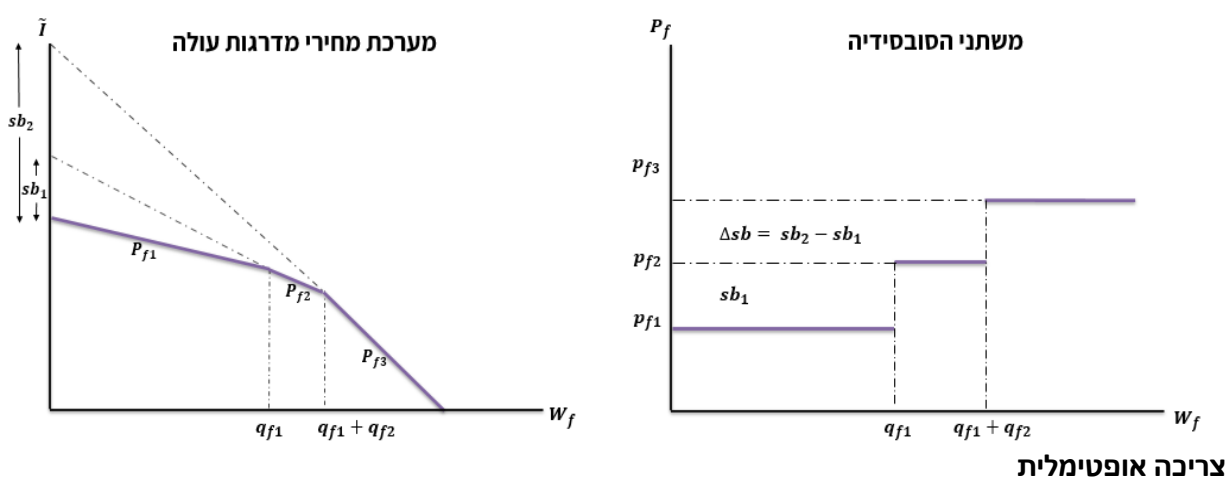
סובסידיה

כאמור, מערכת המחירים המדורגת (איור 1) מגלמת בתוכה סובסידיה לצרכן המים החקלאי, שכן בהינתן משק מים לחקלאות שהכנסותיו ממכירת המים שקול להוצאות אספקת המים, וקיימת צריכת מים במדרגות המחיר הגבוהות מזו התחתונה, הרי שהמחיר במדרגה התחתונה בהכרח נמוך מהעלות השולית. נגדיר את הסובסידיה הגלומה במדרגת מחיר $k < 3$ עבור צרכן i , sb_i^k , כהפרש בין מחיר המים במדרגה k למחיר במדרגה הבאה, מוכפל במכסה של אותה מדרגה:

$$sb_i^k = (p^{fk+1} - p^{fk}) \sum_1^k q_i^{fk} \quad (1)$$

ערכי הסובסידיה (שבאמור ידועים גם בשם משתני ההפרש) שימשו לראשונה את Nordin (1976) ובהמשך את Nauges & Blundell (2001) באמידה א-פרמטרית של ביקוש משקי בית למים, שהתייחסו לסובסידיה כמשתנה המייצג הכנסה וירטואלית, הנוספת להכנסת משק הבית. בניתוח הנעשה כאן, העוסק בביקוש למים לשימוש חקלאי, הסובסידיה מייצגת את אפקט ההכנסה על הביקוש למים דרך המנגנונים הנזכרים לעיל: כמות החקלאים הפעילים, שטח גידולי שלחין, הסיכון וההשקעות. איור 2a מדגים את ערכי הסובסידיות המחושבים עבור כל מדרגה בהתאם למשוואה (1). איור 2b מתאר את אפקט ההכנסה הגלום במגבלת תקציב קמורה של צרכן חקלאי, המשורטטת במערכת צירים של צריכת מים שפירים (w_f) ושאר גורמי הייצור, המיוצגים כמוצר מורכב שמחירו מנורמל ל-1 וכמותו מסומלת כ- \tilde{I} .

איור 2: (2a) סובסידיה כמשתנה הפרש (מימין) – הגדרת ערכי הסובסידיה הנוצרים בהינתן מדרגות מחיר ומכסות שנתיות. (2b) הצגת רמות הסובסידיה כאפקט ההכנסה הגלום במגבלת תקציב קמורה הנוצרת כתוצאה מקיום מערכת מחירי המדרגות של המים השפירים ביחס למחירי שאר גורמי הייצור החקלאי, המיוצגים על ידי מוצר מורכב \tilde{I} שמחירו מנורמל ל-1 (משמאל).



אמידת הביקוש תחת מבנה מחיר מדורג תבוצע על פי הגישה הא-פרמטרית שפותחה על ידי Blomquist & Newey (2000). בהתאם לגישה זו, בחירת כמות המים הנצרכת מתוארת כפונקציה של כלל מרכיבי מערכת המחירים; דהיינו, כפונקציה של כלל המחירים, המכסות והסובסידיות הגלומות במדרגות המחיר. ניתן לבטא את תוחלת הצריכה האופטימלית כתלות בקבוצת המשתנים המרכיבה את מערכת מחירי המדרגות x_i , באופן הבא:

$$E[w_i^* | x_i] = \bar{w}(x_i) \quad (2)$$

כאשר x_i כולל את ווקטור מחירי המדרגות p , ווקטור המכסות q_i , ומאפיינים נוספים של החקלאי i , כולל רכיב של הטרוגניות בלתי נצפית v . בהינתן מערכת מדרגות מחיר עולה (כלומר, מגבלת תקציב קמורה), ניתן לצמצם את ממדיות בעיית האמידה באמצעות ההנחות הבאות:

- i. בהינתן מגבלת תקציב קמורה (איור 2), פונקציית הצריכה הינה $w^* = D(q, p, v)$
- ii. רכיב ההטרוגניות הלא נצפית v לא מתואם עם סט המכסות והמחירים מספרי התעריפים ברשות המים
- iii. הצריכה המבוקשת עולה מונוטונית עם הרכיב הלא נצפה v

(Blomquist & Newey 2000) מוסיפים הנחה רביעית לגבי היעדר צריכה אפסית אשר תורמת לפשטות האמידה. אולם, כפי שהוצג בהקדמה, הסובסידיה הגלומה במבנה התעריפים עשויה להשפיע על בחירת החקלאי בין גידולי בעל לגידולי שלחין. לפיכך, איננו יכולים להניח היעדר צריכה אפסית ברמת החקלאי הבודד. אולם הנתונים שבידנו הינם ברמת היישוב החקלאי, ולמעשה אינם כוללים תצפיות של צריכה מאופסת של מי השקיה.

בהינתן הנחות אלו, תוחלת צריכת המים המותנית נתונה על ידי:

$$\bar{w}(x_i) = \bar{D}(sb_{K-1}, p_K) + \sum_{k=0}^{K-2} [\theta(sb_k, p_k, q_k) - \theta(sb_{k+1}, p_{k+1}, q_k)] \quad (3)$$

כאשר:

$$\theta(sb, p, q) = \int_{-\infty}^{D^{-1}(sb, p, q)} [D(sb, p, v) - q] g(v) dv \quad (4)$$

ו- $g(v)$ היא פונקציית הצפיפות של הרכיב הלא נצפה. מכאן שצריכת המים נתונה על ידי הצריכה הממוצעת בתנאי סט מחירים ליניארי $\bar{D}(sb_{K-1}, p_K)$. בתוספת האיבר המייצג את השפעת האי ליניאריות של סט מגבלות המחיר, הנובעת מקיום מדרגות מחיר, $\sum_{k=0}^{K-2} [\theta(sb_k, p_k, q_k) - \theta(sb_{k+1}, p_{k+1}, q_k)]$.

אסטרטגיית אמידה

במסגרת האמידה הא-פרמטרית של הביקוש למים תחת מערכת מחירי מדרגות, בוצע קירוב לפונקציית ביקוש באמצעות פולינום של משתנים הכוללים את רכיבי מערכת מחירי המדרגות, כולל המחירים, המכסות והסובסידיות. במסגרת האמידה נכללו גם משתנים מסבירים העשויים להשפיע על הביקוש למים בחקלאות, כגון משקעים בחודשים שלפני ואחרי עונת ההשקיה, טמפרטורה ממוצעת במהלך עונת ההשקיה, מכסה של מים שוליים נוספת לשפדן (כגון קולחים ומליחים), ומשתנה מגמה המייצג שינויים בתנאי הסחר של הענף על פני זמן. בחירת האיברים שיכללו בפולינום נעשתה בשלבים, תוך שימוש בקריטריון המכונה "אימות צולב" - (CV) Cross Validation, המתואר בהמשך. תהליך הקירוב לפונקציית ביקוש החל בהכללת רכיבים בסיסיים כמו מחיר המים במדרגה הראשונה (בה נצפתה מרבית הצריכה של מים שפירים) ומשתנים מסבירים נוספים. בכל שלב נבחר מתוך מרכיבי מערכת מחירי המדרגות איבר נוסף להכללה בפולינום, על פי מידת תרומתו לצמצום ערך קריטריון ה-CV. משוואות הביקוש ההתחלתיות למים שפירים ולמי שפדן נראות כך:

$$w_{it}^f = \beta_0 + \beta_1 p_t^f + \beta_2 q_{it}^f + \beta_3 q_{it}^n + \beta_4 sb_{it}^1 + \gamma_1 prep_{it} + \gamma_2 postp_{it} + \gamma_3 temp_{it} + \gamma_4 trend_t + a_i + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

$$w_{it}^s = \beta_0 + \beta_1 p_t^s + \beta_2 q_{it}^s + \beta_3 q_{it}^n + \beta_4 sb_{it}^1 + \gamma_1 prep_{it} + \gamma_2 postp_{it} + \gamma_3 temp_{it} + \gamma_4 trend_t + a_i + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

כאמור, המחיר המדרגה התחתונה הכולל בסט המשתנים הבסיסיים, כיוון שצריכתם של מרבית הצרכנים החקלאיים "נעצרה" במדרגה זו. זאת בניגוד לניתוח שהתמקד בביקוש למים ביתיים של Nauges & Blundell

(2001), שבו הוכלל המחיר במדרגת המחיר העליונה. אתגר מרכזי באמידת המודל מבוסס נתוני פאנל נובע מחשש לאנדוגניות אשר עשויה להתעורר כאשר קיים מתאם בין הטרוגניות בלתי נצפית ובין המשתנים המסבירים הנצפים. כדי להתמודד עם אתגר זה, בוצעה השוואה שיטתית בין מודלים לאמידת נתוני פאנל עם אפקטים קבועים (FE) ואפקטים אקראיים (RE), תוך שימוש במבחן האוזמן. מבחן זה מאפשר לקבוע האם קיימת אנדוגניות באמצעות בחינת אותו מתאם. תוצאות מבחן האוזמן מהוות אינדיקציה להתאמת מודל אפקטים קבועים וכך ולהשמיט רכיב הטרוגני קבוע על פני זמן. הבחירה במודל אפקטים קבועים כרוכה אם כן בהנחה נוספת למודל והיא שהשוונות הלא נצפית של צרכן, שעלולה להיות מתואמת עם המשתנים המסבירים, הינה קבועה על פני זמן. גישה זו יושמה בעבר בניתוחי ביקוש למים ביתיים במבנה פאנל (Nauges & Thomas, 2000).

כאמור, על פי קריטריון ה-CV, נבחר בכל שלב האיבר הבא שיתווסף לפולינום, וכן מספר האיברים הסופי (נקודת העצירה). בניגוד ליישום של (Nauges & Blundell, 2001), קריטריון ה-CV ששימש במסגרת עבודה זו תואם סט נתוני פאנל. הקריטריון שהוצע עלי ידי (Colby & Bair, 2013), ניתן לביטוי באופן הבא:

$$CV = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{t=1}^{T_i} (w_{it} - \hat{w}(x_{-it}))^2}{T_i} \quad (7)$$

כאשר T_i מייצג את מספר שנות התיעוד בבסיס הנתונים לצרכן i , w_{it} היא רמת הצריכה הנצפית של צרכן i בזמן t , ו- $\hat{w}(x_{-it})$ מייצג את הפרדיקציה של רמת הצריכה של צרכן i בזמן t במודל אמידה ללא תצפית זו. פרדיקציה זו שימשה למדידת השוונות בין הערך החזוי לערך הנצפה. תהליך זה נעשה עבור כל התצפיות לאותו צרכן, וחושב ערך השוונות הממוצע לצרכן. התהליך חזר על עצמו לכל הצרכנים כך שבסופו מחושב ערך שוונות ממוצע על פני הצרכנים. בחינת ערך הקריטריון מתבצעת בכל שלב בו מתווסף איבר לפונקציית הפולינום, עד למצב בו לא ניתן היה לצמצם את ערך הקריטריון (נק' מינימום). לשם השוואה, במהלך בחירת מרכיבי הפולינום חישבנו גם את קריטריון ה-AIC לבחירת משתנים במסגרת אמידה של מודל נראות מקסימלית מותנית (Greven & Kneib, 2010), שבניגוד לקריטריון ה-CV נסמך על אותן הנחות של התפלגות הטעויות עליהן נסמכת שיטת הנראות המקסימאלית.

נתונים

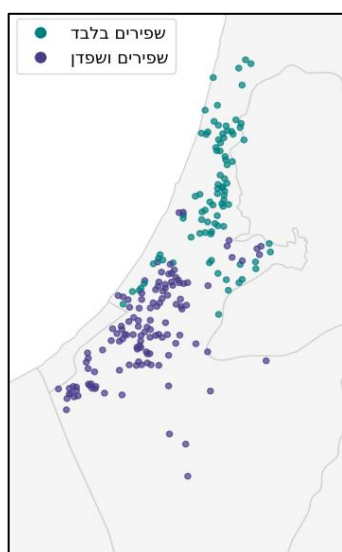
המחקר התבסס על נתוני פאנל של צריכת מים, מכסות ותעריפים ברמת היישוב החקלאי (קיבוצים ומושבים), לשנים 2015-2022. הנתונים נאספו ממספר מקורות: תיעוד שנתי של צריכה ומכסות וכן של תעריפים עונתיים נלקח מארכיון רשות המים; נתונים מטאורולוגיים, מהשירות המטאורולוגי הישראלי; מאפייני יישובים נוספים נאספו מהלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. במסגרת עיבוד הנתונים התאמנו את הנתונים המטאורולוגיים ליישובים על בסיס שיטת המשקולות ההופכיים למרחקים (Kurtzman & Kadmon, 1999). נתונים אלו, שנדגמו במקור בתדירות של 10 דקות, עובדו לכדי ממוצעים חודשיים (IMS; Kapara, 2024). כמו כן, תיקנו את התעריפים העונתיים למחירים ריאליים באמצעות בניית ממוצע פשוט לתעריף שנתי ותיקון שלו לפי מדד מחירי

התפוקה החקלאית של הלמ"ס כדי ליצור מדד של תנאי סחר בחקלאות (איור 3). המדגם כלל 211 צרכנים חקלאיים, אשר פרוסים מצפון מישור החוף ועד הנגב המערבי (איור 4). הפריסה הגיאוגרפית איננה אחידה: צרכני שפירים בלבד וצרכנים בעלי גישה לשפדן מרוכזים בחלק הצפוני והדרומי של אזור המדגם, בהתאמה. באזור השפלה והרי ירושלים נצפה תמהיל יחסית מאוזן של שני סוגי הצרכנים.

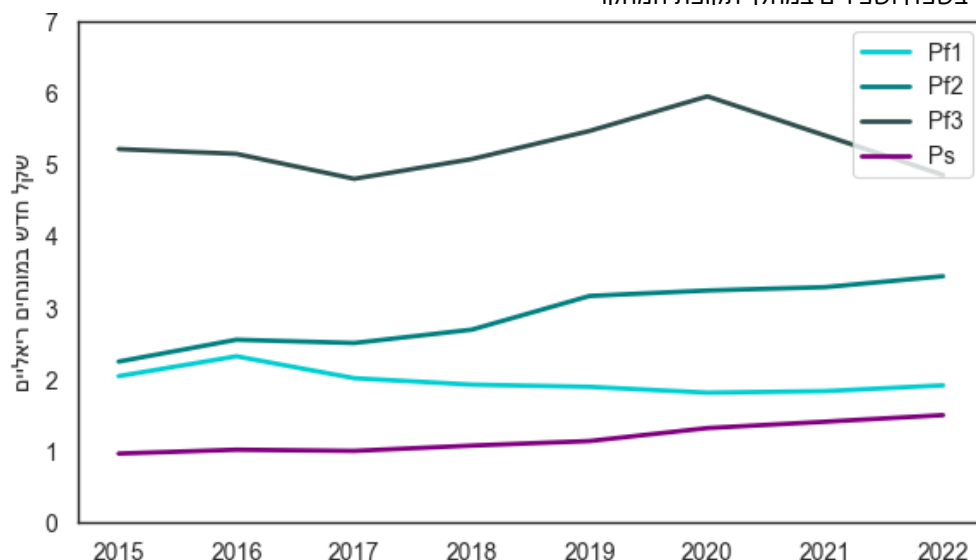
סטטיסטיקה תיאורית

מדגם הפאנל כלל 1567 תצפיות של 87 ישובים בעלי גישה לשפירים בלבד, ו-128 ישובים בעלי גישה לשפירים ולשפדן. מתוך צרכני השפדן, 51 צרכנים הם בעלי גישה לאלטרנטיב מים שוליים נוספת (קולחים או מליחים), וארבעה צרכני שפירים בלבד אשר גישתם לשפדן נוספה במהלך תקופת התיעוד. בכדי להבטיח אמידת ביקוש לצריכה חקלאית הוסרו צרכנים בעלי צריכת השקיה שנתיית של פחות מ-50 אלף מ"ק (העשויה להצביע על התמקדות בפעילויות לא חקלאיות ביישוב), וכאלו עם צריכה נמוכה מ-10 אלף מ"ק של מי צריכת שפדן במידה וקיימת גישה. בנוסף, לצורך שמירה על מבנה פאנל מאוזן, כללנו רק ישובים עם לפחות שלוש שנות תצפית בתקופת המחקר. בממוצע שנתי, ישובים בעלי גישה למים שפירים בלבד כוללים 77 תצפיות, בעוד שישובים בעלי גישה לשני המקורות כוללים 120 תצפיות (טבלה 1).

איור 4: פריסה גיאוגרפית של ישובים חקלאיים לפי קבוצת גישה.



איור 3: תעריפים המים מתוקננים לכדי תנאי סחר בחקלאות, הגרף מדגיש את שינוי התעריפים בשפדן ושפירים במהלך תקופת המחקר



טבלה 1: התפלגות תצפיות המדגם לפי שנים וקבוצות גישה לשני סוגי המים

סה"כ	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	תצפיות לפי גישה
616	71	74	72	76	81	82	81	79	צרכני שפירים בלבד
951	112	116	118	122	123	123	119	118	צרכני שפירים ושפדן

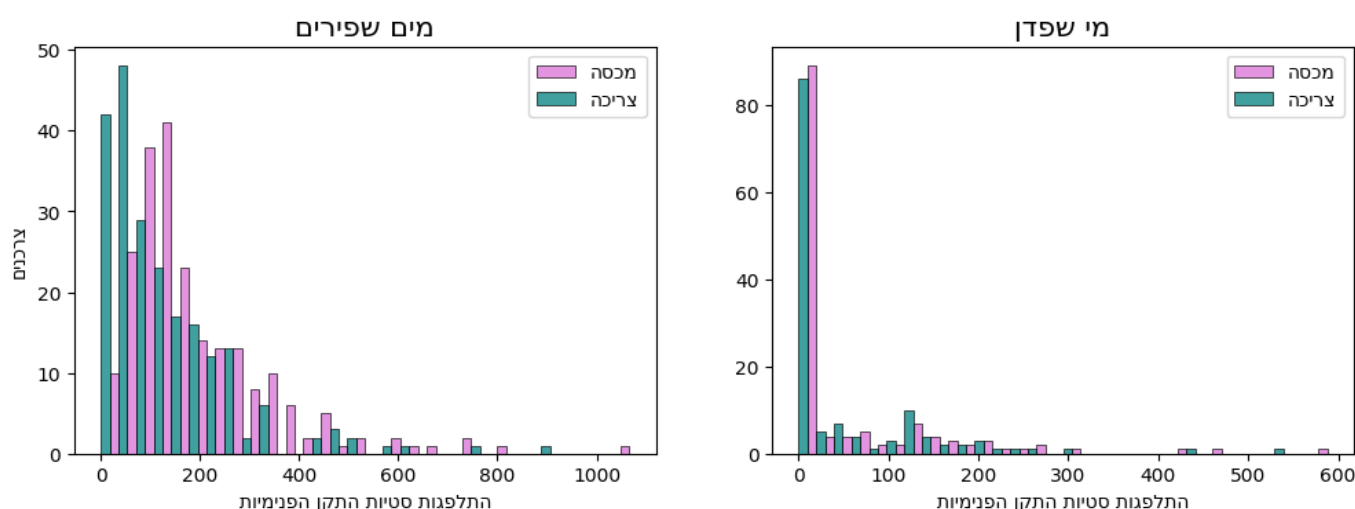
טבלה 2: נתוני צריכה ומכסה באלמ"ק, תנאי אקלים ומאפיינים דמוגרפיים בישובים עם וללא גישה לשפדן.

ישובים ללא גישה לשפדן		ישובים בעלי גישה לשפדן		
ממוצע	ס. תקן	ממוצע	ס. תקן	צריכה והמכסה שנתיים (אלמ"ק)
471.3	360.6	1439.7	945.7	צריכת מי השקיה כוללת
598.1	410.3	727.2	545.2	מכסת שפירים
471.3	360.6	505.0	447.4	צריכת שפירים
453.5	353.9	470.8	419.2	צריכת שפירים בתעריך ראשון
7.2	20.8	13.6	43.9	צריכת שפירים בתעריך שני
10.5	64.0	20.6	82.3	צריכת שפירים בתעריך שלישי
-	-	980.3	682.7	מכסת שפדן
-	-	934.8	696.5	צריכת שפדן
ממוצע	ס. תקן	ממוצע	ס. תקן	אקלים
26.00	0.21	26.13	0.20	טמפ' יומית ממוצעת בעונה (מאי-ספט', מעלות צלסיוס)
22.32	16.56	17.58	12.86	משקעים בטרומ עונת ההשקיה (אפר'-מאי, מילימטרים)
15.1	16.91	13.84	15.64	משקעים בסוף עונת ההשקיה (ספט'-אוק', מילימטרים)
ממוצע	ס. תקן	ממוצע	ס. תקן	מאפיינים אחרים
3443.0	3802.5	6140.3	4751.3	שטח היישוב (דונם)
-	-	0.34	0.47	גישה למקור שוליים נוסף
-	-	888.0	782.8	גובה מכסת השוליים הנוספים (אלמ"ק)

בבחינת צריכת המים הכוללת, ישובים בעלי גישה לשני המקורות צרכו בממוצע 1,439.7 אלמ"ק מי השקיה, לעומת 471.3 אלמ"ק בישובים עם גישה למים שפירים בלבד (טבלה 2). בקרב צרכנים ללא גישה לשפדן, נוצלו בממוצע 79% ממכסת המים השפירים, כאשר כ-96% מסך הצריכה הייתה בתעריך הבסיס (453.5/471.3 אלמ"ק), ורק 2% בתעריך המקסימלי. לעומת זאת, ישובים בעלי גישה לשני המקורות ניצלו 69% ממכסת המים השפירים שלהם (505/727.2 אלמ"ק), כאשר 93% מצריכת המים השפירים הייתה בתעריך הבסיס ו-4% במדרגה השלישית. ישובים אלו הסתמכו במידה רבה על מי שפדן, כפי שמשתקף בניצול של 95% ממכסת השפדן שהוקצתה להם. כאמור, על בסיס רמות הצריכה הגבוהות של מים שפירים במדרגת הבסיס וניצול ממוצע חלקי של מכסת השפירים במדרגה זו, התייחסנו באמידה לתעריך המדרגה הראשונה כמחיר השולי הממוצע

בקרב כלל הצרכנים, בניגוד לאמידת ביקוש ביתי על ידי (Nauges & Blundell, 2001), בה המחיר השולי היה מדרגת המחיר העליונה. המשתנים המסבירים שלנו כללו מאפיינים אקלימיים של הישובים במדגם. חילקנו את נתוני המשקעים לשתי תקופות: תחילת עונת ההשקיה (אפריל-מאי) ותום עונת ההשקיה (ספטמבר-אוקטובר). חלוקה זו נעשתה מתוך ציפייה לכך שמשקעי תחילת העונה עשויים להשפיע על החלטות השקיה ותכנון גידולים. ניתן לבסס החלטה זו על ממצאי (Finkelstein et al. (2020 בנוגע להשפעה הספציפית של משקעי אפריל על צריכת המים. גשמי הסתיו בסוף עונת ההשקיה סימלו כגבול טבעי בין עונות שנה וכתקופת זריעה והנבטה של גידולי השדה. ישובים ללא גישה לשפדן רשמו משקעים גבוהים יותר בשתי התקופות (22.32 מ"מ ו-15.1 מ"מ בהתאמה) בהשוואה לישובים עם גישה לשפדן (17.58 מ"מ ו-13.84 מ"מ בהתאמה). הטמפרטורה היומית הממוצעת לעונת ההשקיה (מאי-ספטמבר) הראתה ערכים דומים בין הקבוצות: 26 מעלות צלזיוס בישובים ללא גישה לשפדן ו-26.13 מעלות בישובים עם גישה. ערכים אלו שיקפו מדידות יום ולילה, מה שהסביר את ערכיהם הנמוכים יחסית. גודלם הממוצע של ישובים עם גישה לשפדן עומד על 6,140 דונם לעומת 3,443 דונם ממוצע לצרכן ללא גישה לשפדן. בקרב צרכני השפדן, תועדו גם צרכני מים שוליים נוספים. למעשה, 34% מהתצפיות לצרכני שפדן היוו צרכנים עם מספר מקורות של מים שוליים (שפדן וגם קולחים או מליחים). עבור אותן תצפיות, המכסה השנתית הממוצעת למים שוליים נוספים עמדה על 888 אלמ"ק. באשר לנתוני הצריכה והמכסה, זיהינו סטיות תקן גבוהות עבור שני מקורות המים. השונות הגבוהה עשויה לנבוע מהבדלי גודל בין קבוצות צרכנים או לשקף שונות פנימית אשר מבטאת את התנודתיות בצריכה ובמכסה של כל צרכן לאורך השנים. באיור 5 מוצגת התפלגות השונות הפנימית (ס"ת) של הצריכה והמכסה עבור מים שפירים ומי שפדן. ניתן לראות כי עבור מים שפירים, השונות הפנימית גבוהה הן בצריכה והן במכסה, דבר שעשוי להעיד אי יציבות ההקצאה על פני שנים. לעומת זאת, במי שפדן, מרבית הצרכנים מציגים שונות פנימית נמוכה הן בצריכה והן במכסה, נתון המרמז על כך שהשונות הגבוהה נובעת בעיקר מהבדלי גודל בין צרכנים ולא מתנודתיות פנימית.

איור 5: התפלגות סטיות התקן הפנימית בקרב צרכנים עבור מכסה וצריכה למי שפדן (מימין) ומים שפירים (משמאל).



תוצאות

אמידת מודל של אפקטים קבועים

כאמור, מבחן האוזמן דחה את ההשערה לחוסר מתאם בין רכיב השגיאה למשתנים המסבירים בשני האומדנים (שפירים ושפדן), ולכן נעשה שימוש במודל אפקטים קבועים. משוואות הביקוש לאמידה הורכבו בעזרת מזעור קריטריון ה-CV (טבלה 3). נספח א' לעבודה מתאר ביתר פירוט את הרכבי איברי הפולינום בתהליך בחירת הרכיבים. אנו מציגים ארבעה קריטריונים לטיב התאמה: AIC, CV, מותאם, מבחן פישר וסכום ריבועי הטעויות. קריטריון ה-CV הוא הקריטריון העיקרי שלפיו נבחרו מרכיבי פונקציית הפולינום בדומה לעבודתם של Nauges & Blundell (2001). בפיתוח הפולינום שהותאם עבור שני סוגי המים, תהליך הוספת המשתנים נעצר בשלב השלישי, לאחר הוספת שני איברי פולינום בכל מודל. באמידת הביקוש למים שפירים לכלל המדגם נוספו גם רכיב המתאר אינטראקציה בין ערך הסובסידיה לגובה מכסת השפירים ואיבר סובסידיה נוסף רק עבור צרכנים בעלי גישה לשפדן. באמידת הביקוש לשפדן נוסף רכיב ראשון שמתאר יחס בין יחסי המחירים של שני המקורות וכן אינטראקציה בין גובה מכסת השפדן לרכיב סובסידיה הגלום במערכת המדורגת של המים השפירים.

טבלה 3: שלבי בחירת מרכיבי הפולינום על פי מזעור קריטריון ה-CV.

משתנה תלוי: צריכת שפירים					
שלב	משתנים נוספים ¹	F stat	MSSE	AIC	CV
1	חותך, מחיר, מכסה, סובסידיית בסיס	17.1	26169	20405	128137
2	מכסת שפירים x פער ערכי הסובסידיות	15.6	24688	20316	111460
3	דמי שפדן x סובסידיה כוללת	14.6	24566	20310	108698
4	דמי שפדן x סובסידיית בסיס	13.8	24214	20289	112161
משתנה תלוי: צריכת שפדן					
שלב	משתנים נוספים ¹	F stat	MSSE	AIC	CV
1	חותך, מחיר, מכסה, סובסידיית בסיס	142.5	4415	10698	25309
2	ריבוע פערי המחיר בין שפדן לשפירים	127.8	4379	10692	24074
3	מכסת שפדן x פער ערכי הסובסידיות	125.3	4374	10694	23873
4	פער ערכי הסובסידיות	113.9	4373	10695	24112

(1) בכל אמידה נוספו משתני אקלים, מכסת שוליים נוספת ומשתנה מגמה

צריכת שפדן (בעלי גישה לשפדן)	צריכת שפירים (מדגם מלא)	
-103.09*	-192.62***	מחיר עצמי
0.819***	0.472***	מכסה
16.389**	-16.11**	מגמה
-1.052***	-3.689***	משקעי טרום עונת השקיה
1.038***	-0.407	משקעי תום עונת השקיה
61.623***	312.099***	טמפרטורה יומית ממוצעת
-0.034*	-0.077	מכסת שוליים נוספת
0.021***	0.051	סובסידיות בסיס
-	0.000026***	מכסת שפירים x פערי הסובסידיות
-	-0.036**	דמי שפדן x סובסידיה כוללת
48.952***	-	ריבוע פער המחירים בין שפדן לשפירים
0	-	מכסת שפדן x פערי הסובסידיות
-1454***	-7328***	קבוע
951	1567	מספר תצפיות
125.34	14.59	מבחן F
0.773	0.184	מקדם מתאם (adjusted-R)

*, **, *** מצינים מובהקות סטטיסטית בר"מ 10%, 5% ו 1% בהתאמה

תוצאות אמידה הפולינומים שהותאמו עבור שני סוגי המים מפורטות בטבלה 4. בהתאם לציפיות, מקדם השפעת המחיר על הביקוש לשני סוגי המים שלילית ואילו השפעת המכסה חיובית. אולם מקדמים אלו מציגים השפעות חלקיות, שכן ניתוח מלא של השפעות אלו מצריך לקחת בחשבון השפעות עקיפות מתוך איברי הפולינום השונים שהוספנו בתהליך הרכבת משוואת הביקוש, כפי שיפורט בהמשך. בהתייחס להשפעות המשתנים המסבירים האחרים, ראשית, משתנה המגמה הראה קיטון של 16.11 אלמ"ק בצריכת השפירים הממוצעת מדי שנה, לעומת גידול בצריכת השפדן הממוצעת ב-16.39 אלמ"ק לשנה. כלומר, במהלך התקופה חלה החלפה הדרגתית של מים שפירים במי שפדן ביחס של 1:1 בקירוב. למשקעים בטרום עונת ההשקיה השפעה שלילית על הצריכה הממוצעת של שני סוגי המים, כאשר ההשפעה בשפירים גבוהה בפער ניכר. ממצא זה מעיד על חיסכון במי השקיה עם כל מילימטר גשם נוסף בחודשי אפריל ומאי, כאשר כל מילימטר נוסף של גשם חוסך לצרכן הממוצע 3.689 אלמ"ק של שפירים ו-1.052 אלמ"ק שפדן. ממצא לא צפוי הוא הקשר החיובי שנצפה בין משקעי הסתיו (סוף עונת ההשקיה) ובין צריכת השפדן, כאשר כל מילימטר נוסף של גשם בחודשי ספטמבר ואוקטובר מגדיל

את צריכת השפדן הממוצעת ב-1.038 אלמ"ק. נמצא קשר חיובי משמעותי בין הטמפרטורה היומית הממוצעת בעונת ההשקיה לבין הצריכה. כאשר, גידול של אחוז בטמפ' הממוצעת לעונה מגדיל את צריכת השפירים הממוצעת ואת צריכת השפדן הממוצעת ב-81 אלמ"ק ו-16 אלמ"ק בהתאמה. למכסת המים השוליים הנוספים נצפתה השפעה שלילית (מובהקת בר"מ 10%) על צריכת השפדן, כאשר כל גידול של אלמ"ק במכסת השוליים האחרים (קולחים או מליחים) מצמצמת את צריכת השפדן ב-34 מ"ק. מתוך איברי הפוליון שנוספו למשוואות הביקוש, ממצא בולט הוא הקשר החיובי בין פער המחירים של סוגי המים לצריכת השפדן: ככל שגדל פער המחירים בין מדרגת הבסיס של שפירים (p^{f1}) למחיר השפדן (p^s), צריכת השפדן גדלה גם היא. משוואות (8) ו-(9) מציגות את האומדן לכמות המבוקשת למים שפירים ולמי שפדן בהתאמה. משוואות אלו מכילות את ההשפעות הישירות של משתני המחיר והמכסה של השפדן ושל מדרגת המחיר הראשונה של שפירים.

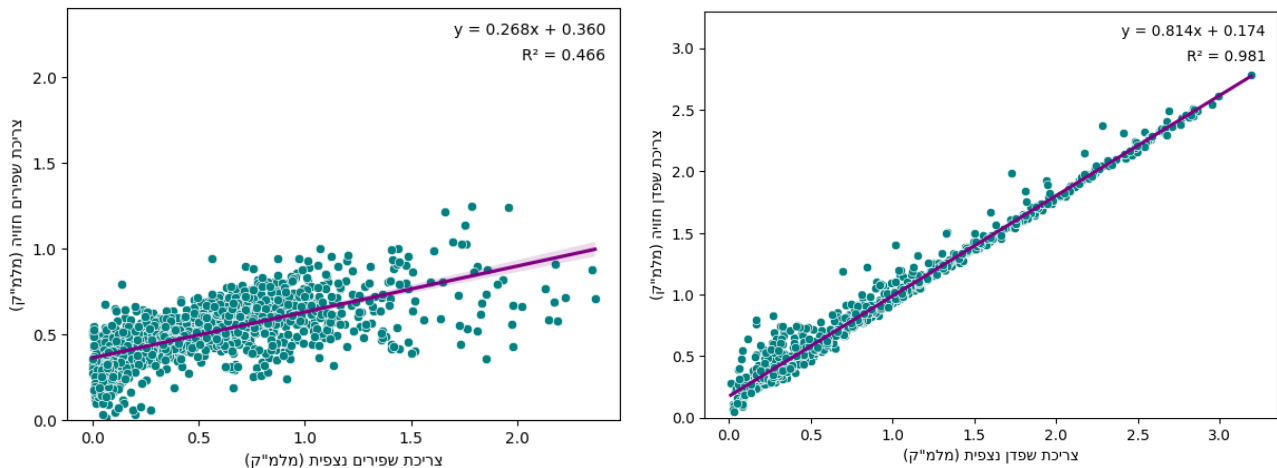
$$\widehat{w_{it}^f} = -7328 - 192.6 \cdot p_t^{f1} + 0.47 \cdot q_{it}^{f1} - 3.7 \cdot prep_{it} + 312.1 \cdot temp_{it} - 16.1 \cdot trend_t + \left(2.6 \cdot 10^{-5} \cdot q_{it}^{f1} \Delta sb_{it} - 3.6 \cdot 10^{-2} \cdot s_a sb_{it} \right) \quad (8)$$

$$\widehat{w_{it}^s} = -1454 - 103.1 \cdot p_t^s + 0.82 \cdot q_{it}^s - 0.03 \cdot q_{it}^n - 1.05 \cdot prep_{it} + 1.04 \cdot postp_{it} + 61.62 \cdot temp_{it} + 16.4 \cdot trend_t + \left(0.02 \cdot sb_{it}^1 + 48.95 \cdot \Delta(p_t)^2 \right) \quad (9)$$

מדד טיב התאמה

לצורך הערכת טיב ההתאמה, מוצגת השוואה בין הצריכה החזויה לבין הצריכה הנצפית לכל תצפית. עבור אמידת צריכת מי השפדן (איור 6), ניכרת התאמה גבוהה בין הצריכה הצפויה והנצפית ($R^2 = 0.98$) וקרבה לקו הזהות (חותך = 0.17, שיפוע = 0.81). אלו מעידים על מהימנות המודל וביטחון נוסף בשימוש במשוואה (9) לצורך ביצוע סימולציות לצריכת השפדן אשר יוצגו בהמשך. מדידת טיב ההתאמה לאומדן הצריכה בשפירים מראה מתאם נמוך יותר ($R^2 = 0.47$) והתרחקות מקו הזהות (חותך = 0.36, שיפוע = 0.27) מה שמעיד על כך שהמודל מתקשה לנבא את הצריכה המבוקשת למים שפירים. הסטייה ניכרת בעיקר בקצוות כאשר המודל חוזה צריכה חיובית עבור אלו שצורכים כמות מים אפסית. ייתכן והסיבה לכך היא ביקוש לשימושים ביתיים כמו גינון וביקוש לצרכי תיירות כפרית. פונקציית הביקוש לשימושים אלה לא בהכרח מתנהגת באופן דומה לביקוש חקלאי. כמו כן, המתאם הנמוך יכול לשקף חוסר במידע חשוב שמשפיע על רמת צריכת השפירים כמו סוגי גידולים, סוג קרקע ומאפיינים טכנולוגיים הנוגעים לשיטות ההשקיה. סיבות אלו יכולות להסביר גם את הפיזור המתרחב בשונות בקרב צרכנים גדולים שסביר שצריכתם מושפעת יותר ממאפיינים חסרים אלו.

איור 6: מדד לטיב התאמה לצריכה חזויה מבוססת על משוואה (8) למי שפדן מימין ומשוואה (9) למים שפירים משמאל.



בכדי לזהות את ההשפעות השוליות של המחירים והמכסות במלואן, ביצענו גזירה מלאה לפי המחיר והמכסה וחישבו הגמישויות התואמות. במסגרת הניתוח ביצענו אמידה גם של ההשפעות הצולבות של המחירים והמכסות, וכן של השפעת שינויים בסובסידיה, המייצגת את אפקט ההכנסה.

מובהקות סטטיסטית להשפעות מחיר ומכסה

היות וגמישויות הביקוש בשיטת אמידה זו אינן מתקבלות באופן ישיר מן המודל אלא מתוך פעולת גזירה מלאה של משוואות האומדן לביקוש ושימוש בערכים ממוצעים במדגם, נרצה לקבל תקפות סטטיסטית לאותם גמישויות. לצורך כך, השתמשנו בפרוצדורת בוטסטראפ המותאמת למבנה נתוני פאנל. שיטה זו מתבססת על דגימה אקראית עם חזרה של אשכולות (צרכנים) מתוך המדגם המקורי, תוך שמירה על כמות הצרכנים של המדגם המקורי בכל דגימה. בצורה זו, סדרת זמן של צרכן מסוים עשויה להיכלל במספר דגימות חוזרות, תוך שמירת התלות הפנימית המאפיינת את התצפיות הקשורות באותו צרכן. הפרוצדורה יושמה בהתאם לשיטת הבוטסטראפ של Cameron et al. (2008). עבור כל דגימה, אמדנו מחדש את משוואות הביקוש, ממנה נגזרו ההשפעות השוליות וגמישויות הביקוש בהתייחס למחיר ולמכסה. תהליך זה בוצע עבור 1000 דגימות, וכך התקבלה שונות של ההשפעות השוליות והגמישויות.

בהתאם למשפט הגבול המרכזי ולספרות (Cameron et al., 2008), מספר האשכולות הגדול במדגם (128 צרכני שפדן ושפירים) מספק בסיס לתמוך בהנחה שההתפלגויות של האומדנים קרובות לנורמליות. קמרון ועמיתיו מצינים כי 50 אשכולות לרוב מספיקים להנחה זו. לפיכך, חישבנו את רמת המובהקות של האומדנים באמצעות מבחן Z. גמישויות הביקוש הנובעות מתוך ממצאי הבוטסטראפ מתוארות לפי סוג ביקוש וקבוצת צרכנים בטבלאות 5-7. אנו מדווחים לכל משוואת ביקוש את הגמישויות העצמיות, את הצולבות עבור צרכני שפדן ושפירים, וכן את השפעת אפקט ההכנסה.

גמישויות הביקוש לשפדן

גמישויות הביקוש למי שפדן בהתייחס למחיר השפדן היא -0.226 (ר"ס 95%: [-0.361, -0.008]). משמעות הדבר היא שהתייקרות של אחוז אחד במחיר השפדן תביא לירידה מתונה של כ- 0.23% בביקוש (טבלה 5). לעומת זאת, הגמישויות ביחס למכסת השפדן נמצאה גבוהה יותר, 0.859 (ר"ס 95%: [0.797, 0.928]). מכאן שכל עלייה של אחוז אחד במכסת השפדן תגדיל את הביקוש לשפדן בשיעור כמעט זהה (0.86%). ממצא זה מתיישב עם רמת הניצול הגבוה של מכסת השפדן בקרב החקלאים, כפי שצוין בפרק תיאור הנתונים. הביקוש לשפדן רגיש גם להשפעות צולבות, כאשר שינוי של אחוז במכסת השפירים מגדיל את הביקוש לשפדן, אם כי באופן חלש של 0.015% (ר"ס 95%: [0.009, 0.025]). למעשה, השפעה זו מתקבלת דרך אפקט ההכנסה, שאת השפעתו אנו אומדים על ידי גזירה לפי הסובסידיה (מכפלת מכסת שפירים בפער המחירים בין המדרגה הראשונה לשנייה) כמשתנה העומד בפני עצמו. מתקבל שגידול באחוז אחד בערך הסובסידיה מביא להשפעת הכנסה חיובית על הביקוש לשפדן בערך של 0.014%. לעומת זאת, הגמישויות ביחס למחיר השפירים לא נמצאה מובהקת (0.132, ר"ס 95%: [-0.103, 0.241]).

טבלה 5: גמישויות הביקוש לשפדן ע"פ תוצאות בוטסטראפ

גמישויות ביקוש לשפדן				
לפי	גמישויות	ס. תקן ב'	רווח סמך 95%	
			סך תחתון	סך עליון
מחיר שפדן	-0.226**	0.09	-0.361	-0.008
מכסת שפדן	0.859***	0.033	0.797	0.928
מחיר שפירים	0.132	0.088	-0.103	0.241
מכסת שפירים	0.015***	0.004	0.009	0.026
אפקט הכנסה	0.014***	0.004	0.009	0.025

*, **, *** מציינים מובהקות סטטיסטית בר"מ 10%, 5% ו 1% בהתאמה

טבלה 6: גמישויות הביקוש לשפירים בקרב צרכנים בעלי אלטרנטיבה, ע"פ תוצאות בוטסטראפ

גמישויות ביקוש לשפירים (בעלי גישה לשפדן)				
לפי	גמישויות	ס. תקן ב'	רווח סמך 95%	
			סך תחתון	סך עליון
מחיר שפירים	-0.648**	0.301	-1.284	-0.105
מכסת שפירים	0.250***	0.097	0.155	0.534
מחיר שפדן	-	-	-	-
מכסת שפדן	-0.088***	0.022	-0.139	-0.051

0.133	-0.088	0.056	-0.021	אפקט הכנסה
-------	--------	-------	--------	------------

***, **, * מצינים מובהקות סטטיסטית בר"מ 10%, 5% ו 1% בהתאמה

טבלה 7: גמישויות הביקוש לשפירים בקרב צרכנים ללא אלטרנטיבה, ע"פ תוצאות בוטסטרפ

גמישויות ביקוש לשפירים (ללא גישה לשפדן)				
לפי	גמישות	ס. תקן ב'	רווח סמך 95%	
			סך עליון	סך תחתון
מחיר שפירים	-0.805***	0.281	-0.326	-1.426
מכסת שפירים	0.488***	0.097	0.760	0.378
אפקט הכנסה	0.017	0.046	0.143	-0.038

***, **, * מצינים מובהקות סטטיסטית בר"מ 10%, 5% ו 1% בהתאמה

גמישויות הביקוש לשפירים

גמישות הביקוש למים שפירים נותחה בהפרדה בין קבוצות הצרכנים ע"פ הגישה לשפדן. הצרכנים מקבוצת בעלי הגישה לשפדן הראו גמישות ביקוש בהתייחס למחיר שפירים במדרגת הבסיס של -0.648 (ר"ס 95%: [-0.105, -1.284]). כלומר, התייקרות של אחוז במחיר מדרגת הבסיס יקטין את הביקוש הממוצע ב- 0.65%, ומכאן שהביקוש למים שפירים גמיש באופן יחסי לזה של השפדן. צרכנים אלו הראו רגישות נמוכה לשינויים במכסה, כאשר כל שינוי של אחוז במכסה מגדיל את הביקוש ב 0.25% (ר"ס 95%: [0.155, 0.534]). ממצא בולט נוסף הוא רגישות ביקוש זה לשינוי צולב במכסת השפדן כאשר גידול של אחוז במכסת השפדן מקטין את הביקוש לשפירים ב- 0.09% (ר"ס 95%: [-0.139, -0.051]). לא נמצאה השפעה עצמית מובהקת של אפקט ההכנסה על הביקוש לשפירים (-0.021, ר"ס 95%: [-0.088, 0.133]).

באשר לקבוצת צרכני השפירים ללא האלטרנטיבה של מי שפדן (טבלה 7), מתקבלת גמישות ביקוש בהתייחס למחיר של -0.805 (ר"ס 95%: [-1.426, -0.326]) ולמכסה 0.488 (ר"ס 95%: [0.378, 0.760]). לא נמצא הבדל מובהק סטטיסטית ברמות הגמישות בין קבוצות הצרכנים עם וללא גישה לשפדן. גם במקרה הזה לא נמצאה השפעה עצמית מובהקת של אפקט ההכנסה על הביקוש לשפירים (0.017, ר"ס 95%: [-0.038, 0.143]).

סימולציות לצריכה מצרפית בשפדן

תכנית האב למשק הקולחים מציבה את מפעל השפדן כמרכיב מרכזי באסטרטגיה של ניצול יעיל של מי שפכים בישראל. על פי התוכנית, צפויה השקעה של כ-3 מיליארד ₪ בהרחבת המפעל ומערכת ההולכה על מנת לספק מענה הולם להיצע השפכים ההולך וגדל. ע"פ תחזית מאזן מי השפדן בשנת 2050, מפעל השפדן צפוי להתמודד עם גידול של 72% בהיצע השפכים ולייצא 293.6 מלמ"ק של מי שפדן להשקיה. על סמך מבחן טיב ההתאמה, המודל האמפירי שהוצג קודם לכן מספק הערכה אמינה לביקוש המצרפי לשפדן ולכן נעשה בו שימוש לעריכת

סימולציות. לצורך בניית תרחישים לכמות המצרפית המבוקשת של מי השפדן, אנו עושים שימוש במשוואה (9) יחד עם ההנחות הבאות:

1. המודל מייצג באופן עקבי את הביקוש של הצרכן החקלאי למי שפדן.
2. מערכת התמחור המדורגת למים שפירים עקבית הן בתעריפים והן במבנה, גם אם בפועל מיושמת כקנסות על חריגות ממכסה.
3. הפרמטרים הבאים נשמרים קבועים: מחיר שפדן במונחים ריאליים, מכסות קולחים נוספים, משקעים בסוף עונת ההשקיה, מכסת השפירים ופער המחירים בין שפדן לשפירים בתעריף הבסיס.

אוכלוסיית צרכני השפדן מונה 136 צרכנים ברמת יישוב, לפי נתוני רשות המים. במהלך השנים 2015–2022, המכסה השנתית המצרפית נעה בין 107.6 מלמ"ק ל-133.7 מלמ"ק (כתלות בהספק מפעל השפדן), בעוד הצריכה המצרפית בפועל נעה בין 102.7 ל-125.3 מלמ"ק בשנה. הצריכה המצרפית לשנת 2020 (שנת המוצא במחקר זה), כפי שמתקבלת מהמודל האמפירי (טבלה 8), חושבה על בסיס ערכי הפרמטרים הממוצעים של קבוצת הצרכנים באותה שנה, והכמות החזויה הוכפלה במספר הצרכנים הכולל. על פי המודל, הכמות שנצרכה על ידי כלל הצרכנים החקלאיים בשנת 2020 עומדת על 126.1 מלמ"ק.

תחת ההנחות שצוינו, הכמות המצרפית החזויה מוצגת כאשר בכל פעם משתנה רק פרמטר אחד, בעוד ששאר הפרמטרים נותרים קבועים (טבלה 9). הטבלה מחולקת לארבעה מקטעים, כאשר בכל מקטע מוצגים מימין ערכי השינוי בפרמטר הנבחן, ומשמאל מוצגת הצריכה הכוללת החזויה הנגזרת מאותם שינויים. הפרמטרים שנבחנו הם: משתנה הזמן, המדגיש כי הביקוש למי השפדן עולה עם השנים, מכסת השפדן, כמות המשקעים באפריל-מאי והטמפרטורה היומית הממוצעת לעונת ההשקיה (מאי-ספטמבר). על פי המודל, הצריכה צפויה לגדול עד שנת 2050 בכ-53%. בנוסף, אנו מציגים תרחיש לשינויים בגובה המכסה, מתוך הבנה שעל מנת שהצריכה תגדל, נדרש גידול במכסה שיאפשר את המגמה הטבעית הזו. מעבר לכך, גידול במכסה כשלעצמו מוביל להגדלת הצריכה, כפי שעולה מממצאי גמישות הביקוש: עלייה של אחוז אחד במכסה מביאה לעלייה של 0.86 אחוז בצריכה. תרחישים נוספים שהוצגו מתייחסים לירידה בכמות המשקעים באביב ולעלייה בטמפרטורה הממוצעת לעונת ההשקיה בהתאם לתחזיות ההתחממות. מהמודל עולה שהתחממות של מעלה אחת בטמפרטורה הממוצעת לעונת ההשקיה, או ירידה של 20% בכמות המשקעים באפריל-מאי, שקולות לתוספת של 8.4 מלמ"ק ו-0.6 מלמ"ק בצריכה, בהתאמה.

טבלה 8: נקודת המוצא בשנת 2020 – ערכי הפרמטרים הממוצעים והשפעתם על הביקוש למים

שנה	מכסה ממוצעת (מלמ"ק)	טמפ' יומית ממוצעת לעונת השקיה (C°)	כמות משקעים ממוצעת באפריל-מאי (מ"מ)	צריכת שפדן מצרפית (מלמ"ק)
2020	1.067	26.13	22.46	126.1

טבלה 9: צריכה מצרפית (מלמ"ק) בתרחישים שונים, תחת שינוי בפרמטר יחיד, כאשר יתר הפרמטרים מוחזקים קבועים.

שינויים בזמן		שינויים בגובה המכסה		שינויים בטמפרטורה		שינויים במשקעים	
שנה	צריכה מצרפית (מלמ"ק)	שיעור שינוי במכסה הממוצעת	צריכה מצרפית (מלמ"ק)	שינוי בטמפ' ממוצעת לעונת השקיה (C°)	צריכה מצרפית (מלמ"ק)	שיעור שינוי במשקעים באפריל-מאי	צריכה מצרפית (מלמ"ק)
2020	126.1	0%	126.1	0	126.1	+20%	125.4
2030	148.4	+10%	138.0	+0.5	130.3	0%	126.1
2040	170.7	+25%	155.8	+1	134.5	-20%	126.7
2050	192.9	+50%	185.5	+2	142.8	-40%	127.4

טבלה 10: תחזית לשנת 2050 – הערכת הביקוש למים תחת שינויים בזמן, במכסות ובאקלים

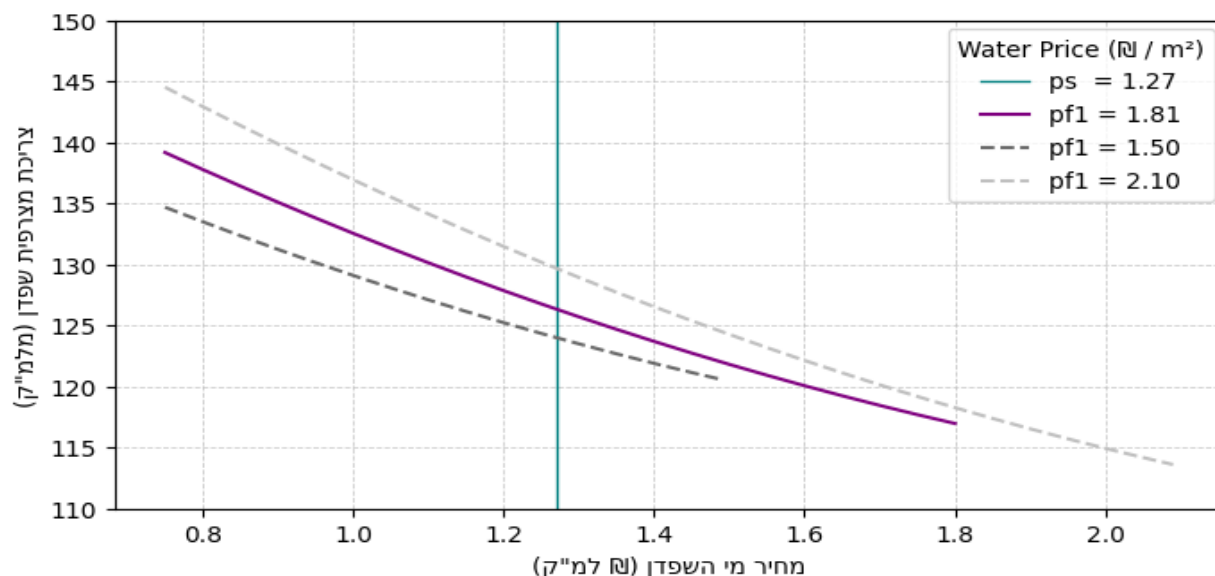
שנה	מכסה ממוצעת (מלמ"ק)	טמפ' יומית ממוצעת לעונת ההשקיה (C°)	כמות משקעים ממוצעת באפריל-מאי (מ"מ)	ביקוש מצרפי לשפדן (מלמ"ק)	שיעור הגידול בביקוש משנת 2020
2050	1.601 (+50%)	28.13 (+2)	17.97 (-20%)	280.9	+123%

תחזית מלאה לשנת 2050 מביאה בחשבון שינוי משולב בכל ארבעת הפרמטרים שנבחנו (טבלה 10). בפרט, אנו מניחים ירידה של 20% בכמות המשקעים בחודשי אפריל-מאי ועלייה של 2 מעלות צלסיוס בטמפרטורה היומית הממוצעת לחודשי מאי-ספטמבר. הנחות אלו עקביות עם תחזיות ההתחממות לאזור הנגב שהוצגו על ידי Zelingher et al. (2019). נוסף לכך, הנחנו גידול של 50% במכסה הממוצעת לצרכן, השערה המייצגת גידול סביר במכסה הכוללת למשק, שיכול לנבוע הן מגידול במכסות האישיות והן מעלייה במספר הצרכנים. לפי תחזית זו, הביקוש החקלאי המצרפי למי השפד"ן בשנת 2050 צפוי לגדול ב-123% ולהגיע לכ-280.9 מלמ"ק בשנה, כמות העולה בקנה אחד עם יעד ההיצע המתוכנן של מי השפד"ן להשקיה.

השפעת מנגנון המחירים

מנגנון המחירים מציג השפעה ברורה על הביקוש למי השפד"ן, אולם השפעתו אינה ליניארית ותלויה בתעריף הבסיס של המים השפירים. להמחשת תלות זו, מוצגת באיור האינטראקציה בין מחיר מי השפד"ן לצריכה המצרפית, ע"ב המודל האמפירי ובהתייחס לשנת 2020. לשם הפשטות הנחנו כי מחיר מדרגת הצריכה השנייה של מים שפירים (3.1 ש"ל למ"ק בממוצע שנתי) והמכסה השנתית הממוצעת למים שפירים (844 אלמ"ק) נותרים קבועים. העקום המרכזי (בסגול) והקו האנכי (כחול) מייצגים את רמות המחירים בשנת המוצא, עבור מי שפדן ומים שפירים בתעריף הבסיס, בהתאמה. העקומות הנוספות (באפור) מציגות תרחישי ביקוש בהינתן רמות מחיר שונות למים שפירים. ניתן לראות כי הוזלת מחיר המים השפירים מפחיתה את הביקוש לשפד"ן, בעוד התייקרותם מביאה לעלייה בביקוש. כמו כן, ניתן להבחין שככל שמחיר מי השפד"ן עולה, שיפוע עקומת הביקוש מתמתן, ממצא המעיד על קיטון בפער המחירים ובעקבות כך ירידה בגמישות הביקוש בהתייחס למחיר העצמי.

איור 8: צריכה מצרפית לשנת 2020 בהינתן שינויים במחיר של מ"ק מי שפדן ומים שפירים להשקיה

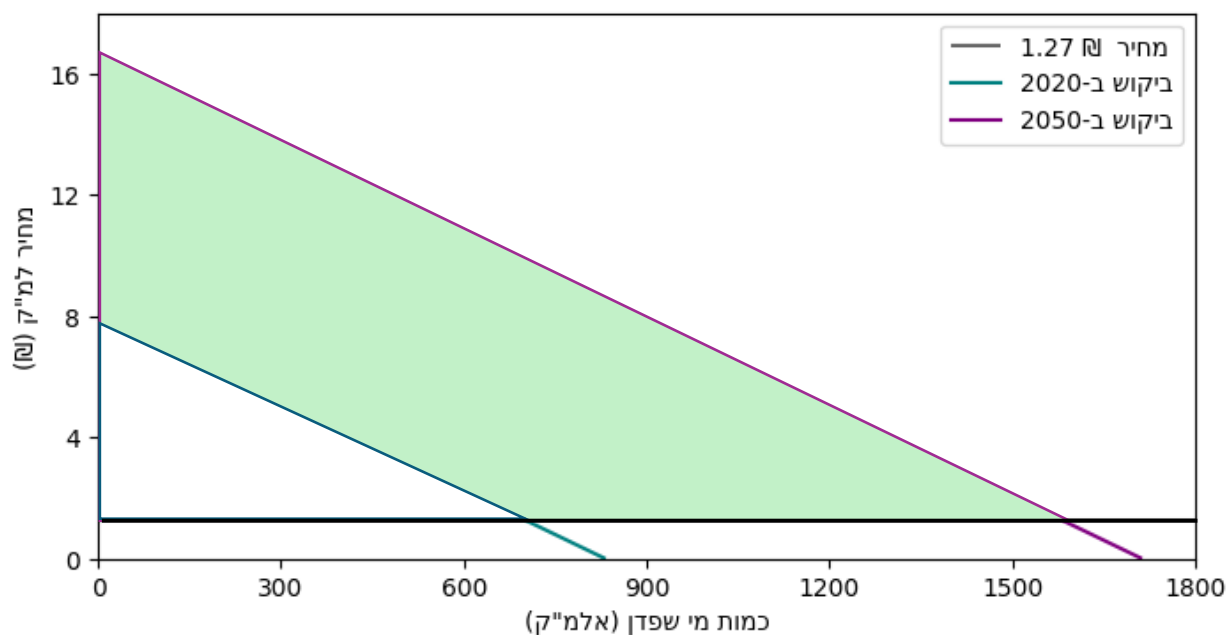


רווחת הצרכנים

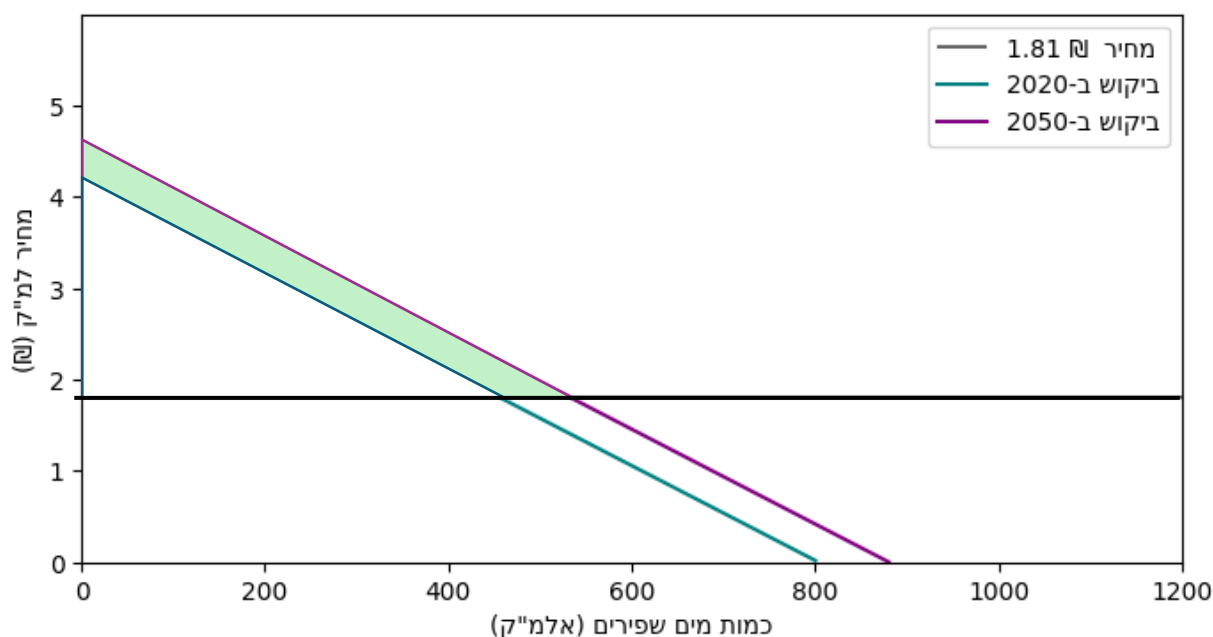
בפרק זה נבחנת ההשפעה הצפויה של השינויים בביקוש למי השפדן על רווחת הצרכנים החקלאיים. חישוב זה מספק הערכה גסה של ההשפעה הכוללת, שכן במציאות עבור רבים מהצרכנים, ערך התפוקה השולית פוגש במכסה ולא במחיר, מצב המקשה על אומדן מדויק של ההשפעה. אנו מניחים כי בממוצע, ערך התפוקה השולית פוגש במחיר, ומשם משליכים על כלל המשק. לשם כך נעשה שימוש בעקומות ביקוש ליניאריות לשנים 2020 ו-2050, שנבנו מתוך המודל והפרמטרים שהוצגו בפרק הסימולציות. איור 9 מציג את עקומות הביקוש למי השפדן של הצרכן הממוצע לשנים 2020 ו-2050 במישור הכמות-מחיר, כאשר הכמות המבוקשת על ידי צרכן יחיד (אלמ"ק) מוצגת בציר האופקי והמחיר למ"ק (₪) בציר האנכי. השטח התחום מעל המחיר ובין שני הישרים מייצג את השינוי ברווחת הצרכן הממוצע כתוצאה מהגידול הצפוי בהיצע מי השפדן, בהנחה שהמחיר נשאר קבוע ברמתו בשנת המוצא (1.27 ₪ למ"ק). הגידול הצפוי בהיצע מי השפדן עד שנת 2050 מביא לתוספת של כ-9.75 מיליון ₪ לרווחת הצרכן הממוצע, וסה"כ כ-1.326 מיליארד ₪ למשק החקלאי כולו. בהנחה שתוספת זו גדלה באופן קבוע לאורך התקופה, קצב הגידול השנתי ברווחת כלל הצרכנים עומד על כ-44.2 מיליון ₪ לשנה. ערכן הנוכחי של סך התוספות לרווחת הצרכנים על פני תקופה של 30 שנה, כשהוא מהווה לשנת הבסיס בשיעור היוון של 5%, עומד על כ-8.13 מיליארד ₪. לשם ההשוואה ועל פי תכנית האב למשק הקולחים, התועלת החברתית מניצול קולחים לחקלאות במקום הזרמתם לנחלים או לים נאמדת ב-0.7 ₪ למ"ק. בהנחה של גידול קבוע ביכולת קליטת השפכים לאורך התקופה, הערך הנוכחי של חיסכון זה, מהווה ל-30 שנה בשיעור של 5%, עומד על כ-414 מיליון ₪. מכאן שתוספת הרווחה לצרכנים מהרחבת מפעל השפדן גדולה באופן ניכר מהתועלת הסביבתית הנגזרת מהשבת השפכים לחקלאות.

בניתוח דומה לביקוש למים שפירים יחד עם הנחה לסט מחירים ומכסה קבועים (איור 10), בקרב אותה קבוצת צרכנים אומדן הביקוש המצרפי בשפירים לשנת 2050 גדל מעט בעיקר כתוצאה מתרחיש ההתחממות אשר מפצה על הקיטון הטבעי בביקוש. בהינתן שעלות הצריכה נוספת היא בתעריף הבסיס, תוספת הרווחה לכלל הצרכים (אוכלוסיית הצרכנים להם גישה גם שלפדן) היא 27.4 מיליון ₪. קצב הגדילה הקבוע מהווה 0.9 מיליון ₪ וערכן הנוכחי של סך התוספות לרווחת הצרכנים הוא 168 מיליון ₪.

איור 9: עקומת הביקוש לשפדן עבור הצרכן הממוצע לשנת 2020 ולשנת 2050



איור 10: עקומת הביקוש לשפירים עבור הצרכן הממוצע לשנת 2020 ולשנת 2050



דיון

במחקר זה, אמדנו בנפרד את הביקוש למי השקיה שפירים ואת הביקוש למי שפדן, במטרה לזהות גמישויות ביקוש בהתייחס למחיר, מכסה ואפקט ההכנסה של הסובסידיה הגלומה במערכת מדורגת של מחירי מים. כמו כן, אמדנו את השפעתם של גורמי אקלים על הביקוש לשני מקורות מי ההשקיה וערכנו סימולציות לצריכת שפדן מצרפית בהינתן תכנית האב להשקעה במשק הקולחים לשנים הקרובות. ממצאי המודל האמפירי הראו כי הביקוש למי שפדן מתאפיין ברגישות נמוכה לשינויי מחיר ורגישות גבוהה לשינויים במכסה (-0.23 ו- 0.86 בהתאמה). יישום המודל האמפירי על ידי עריכת סימולציה לצריכה מצרפית מהווה בסיס לבחינת הגורמים המשפיעים על הביקוש המצרפי העתידי למי השפדן ולהעריך באופן ראשוני את ההשפעות האפשריות של שינויים אלו על רווחת הישובים החקלאיים. הביקוש למים שפירים הציג רגישות גבוהה יותר למחיר ונמוכה יותר למכסה (-0.65 ו- 0.25 בהתאמה), ללא הבדלים מובהקים בין צרכנים עם וללא גישה לשפדן. השפעת המשתנים האקלימיים על הביקוש נמצאה עקבית עם ממצאים קודמים בספרות, כאשר ההשפעה על צריכת המים שפירים התגלתה כחזקה באופן ניכר ביחס להשפעה על צריכת מי השפדן. להלן דיון בממצאי הביקוש עבור כל אחד ממקורות המים וכן ניתוח ההשפעות האקלימיות.

ביקוש למי שפדן

לכמות מי השפדן הנצרכת תלות משמעותית בגובה המכסה לצד השפעות מובהקות גם למחיר מי השפדן וגם להשפעה צולבת של מנגנון מחירי השפירים. גמישות הביקוש לשפדן בהתייחס למכסת השפדן (0.859) מעידה על רגישות גבוהה במיוחד לגובה המכסה, כאשר תוספת אחוז למכסה תגדיל את הצריכה כמעט באותו שיעור (0.86%). ממצא זה מרמז על פער חיובי בין ערך התפוקה השולית של מי שפדן לבין מחירם, המתבטא ברמת ניצול מקסימלית של המכסה בקרב מרבית התצפיות במדגם (64%). זוהתה רגישות של הביקוש לשפדן גם בהתייחס למחיר, אם כי נמוכה (-0.226) ביחס לתלות במכסה. ניתן לומר כי התייקרות השפדן באחוז תצמצם את הצריכה בפחות מרבע אחוז (0.23%). ממצא זה מייצג את תגובת הצרכנים שאינם מנצלים את מלוא המכסה לשינויי המחיר. ביקוש קשיח למים שוליים נמצא גם במחקר של Finkelshtain et al. (2020), כאשר אמידה של גמישות הביקוש למי השקיה כוללים בהתייחס למחיר המים השוליים הראתה גמישות מובהקת של -0.05 . הביקוש לשפדן מציג מגמת גידול עקבית של 16.4 אלמ"ק בממוצע בשנה ועל חשבון צריכת המים השפירים, מגמה המחייבת התאמה דינמית של מכסות הצריכה לאורך זמן. בפרק הסימולציות הודגשה מגמה זו ביתר שאת, כאשר תרחיש הביקוש לשנת 2050 הצביע על גידול טבעי של 53% בצריכת מי שפדן, זאת בהנחה שהדבר מתאפשר באמצעות הרחבה הדרגתית של המכסות. השפעת מנגנון המחירים והמכסות במים השפירים גם הוא מציג השפעה על הביקוש לשפדן ומביא במחקר זה התייחסות למידת התחליפיות בין המקורות. המודל האמפירי מצביע על כך שהגדלת הסובסידיה דרך הגדלת מכסת השפירים במדרגת המחיר הנמוכה מעלה את הביקוש לשפדן בקרב הצרכנים בעלי הגישה למי שפדן, כאשר ניתן לייחס השפעה זו לאפקט ההכנסה. בנוסף, ניתוחי הרגישות שערכנו מדגישים את השפעת הפער בין מחיר השפדן למחיר המים השפירים במדרגת הבסיס, כאשר גידול בפער זה מוביל לשימוש מוגבר בשפדן ולהפך. ממצאי מחקר זה מאששים אם כך את ההשערה לפיה מי שפדן מהווים תחליף קרוב

למושלם למים שפירים. תחליפיות זו נובעת בשטח מהיעדר מגבלות אגרונומיות על השימוש בשפדן. לדברי עוזי נפתליהו, מדריך גד"ש בנגב המערבי, בניגוד לעבר אין כיום מגבלת מליחות קרקע המונעת השקיה במי שפדן. למעשה, חקלאי גד"ש מעדיפים שפדן על פני מים שפירים בשל העלות הנמוכה. ביסוס לטענה שמענו גם מד"ר אפי טריפלר, מרצה בקמפוס לעקרונות ההשקיה וחוקר במו"פ ערבה, אשר ציין כי רמת המליחות הנוכחית של מי שפדן איננה מהווה חסם עבור רוב גידולי החורף בנגב המערבי (בעיקר תפוחי אדמה וגזר).

ביקוש למים שפירים

גמישות הביקוש למים שפירים ביחס למכסה במדרגת המחיר הבסיסית מראה תוצאות שונות לצרכנים עם אלטרנטיבת השקיה (שפדן) ובלעדיה, כאשר הגמישות עומדת על 0.250 ו-0.488 בהתאמה. תוצאות אלו עולות בקנה אחד עם שיעור ניצול ממוצע גבוה יותר של מכסת הבסיס בקרב צרכני המים השפירים בלבד (79% לעומת 69%). ממצאים אלו נתמכים בהשפעה המתונה של המכסה על הצריכה כפי שנמצא בעבר על ידי Bar-Shira et al. (2006). עם גמישות מכסה של 0.35, וכן על ידי Finkelshtain et al. (2020), אשר הציגו גמישות של 0.21. באשר לגמישות הביקוש למחיר, מצאנו שהתייקרות של אחוז במחיר השפירים במדרגת הבסיס גורמת לירידה של 0.65% בביקוש בקרב צרכנים בעלי אלטרנטיבה של מי שפדן, ולירידה של 0.81% אצל צרכנים שאין ברשותם אלטרנטיבת מים נוספת. גם כאן מתקבלים ערכי גמישויות הדומים לאלו שתועדו על ידי Finkelshtain et al. (2020) כמו גם Bar-Shira et al. (2006), כאשר טווח הגמישויות נע בין 0.46 ל-0.89 בערכים אבסולוטיים. על אף הפערים בין הקבוצות, ניתוח המובהקות לפי שיטת בוטסטראפ לא מאפשר לנו לומר באופן מובהק כי הרגישות לשינויים במכסה ובמחיר שונות בין הקבוצות. יחד עם זאת, זיהינו השפעה צולבת של מכסת השפדן על הביקוש למים שפירים בקרב הקבוצה הרלוונטית: עלייה של אחוז במכסת השפדן מפחיתה את הביקוש למים שפירים ב-0.09%. ממצא זה מעיד על מידת תחליפיות בין שני מקורות המים, הוא מתווסף לגידול הטבעי על פני זמן בביקוש לשפדן ע"ח הביקוש למים שפירים וכן לאפקט ההכנסה הגלום בסובסידיה על המים ממנו מושפע הביקוש לשפדן.

השפעות מזג אוויר ומשקעים

מצאנו כי עלייה בטמפרטורה היומית הממוצעת לעונת ההשקיה (מאי-ספטמבר) מגדילה את הביקוש למים בצורה משמעותית. ממצא זה נתמך על ידי ספרות מקומית וגלובלית בהקשר של הגברת שיעורי האידוי ועלייה בדרישות ההשקיה בחודשי קיץ חמים (Cohen et al. 2002; Helfer et al. 2012). ההבדל הבולט בין שני מקורות המים הוא שעיקר התוספת לביקוש כתוצאה מעלייה של מעלה בטמפ' היומית הממוצעת לעונה, מופנית למים שפירים (312 אלמ"ק), בעוד הגידול בביקוש למי שפדן (61.6 אלמ"ק) מתון יותר. תחזיות האקלים לטווח השנים 2041–2060, כפי שהוצגו על ידי Zelingher et al. (2019), מצביעות על עלייה צפויה בטמפרטורה בטווח של 1.3–3.1 מעלות צלזיוס. בהתאם לכך, ממצאי המחקר שלנו מצביעים על גידול משמעותי בביקוש למי השקיה, כאשר בתרחיש של התחממות מתונה (2 מעלות צלזיוס), הצריכה הצפויה של מים שפירים עולה ב-624 אלמ"ק, בעוד הביקוש למי שפדן גדל ב-123 אלמ"ק. ממצא זה מחזק את ההבנה כי שינויי טמפרטורה הם הגורם הדומיננטי המשפיע על הביקוש למים להשקיה, באופן משמעותי יותר מהשפעות השינויים בכמות המשקעים. יתרה מזאת,

לאור שיעור הניצול הגבוה של מי השפדן, העלייה בביקוש הצפויה מתורגמת בעיקר להעמקת הלחץ על משק המים השפירים.

באשר למשקעי האביב (אפריל-מאי), גם ההשפעה השלילית על הביקוש למים (כלומר החיסכון במים בעקבות ירידת גשמים) בולטת יותר במים שפירים, כאשר השפעה שלילית של גשמי האביב על הביקוש נצפתה בעבר גם במחקר של Finkelshtain et al. (2020). על פי הממצאים, כל מילימטר גשם מביא לחיסכון של 3.69 אלמ"ק מים שפירים, לעומת 1.05 אלמ"ק בלבד במי שפדן. בהסתמך על שטחי הישובים החקלאיים בפרק הנתונים, ישוב חקלאי בעל גישה לשפדן משתרע על פני 6,140 דונם בממוצע, חוסך כתוצאה מתוספת גשם בכמות של מילימטר אחד כמות כוללת של 4.74 אלמ"ק שהם 0.772 מ"ק פר דונם. לעומת זאת, יישוב חקלאי ממוצע ללא גישה לשפדן משתרע על פני 3,443 דונם, חוסך מתוספת מילימטר גשם אחד 3.69 אלמ"ק שהם 1.072 מ"ק פר דונם. ניתן להסיק מכאן שההשפעה היחסית של תוספת מי הגשמים הינה משמעותית יותר עבור אותם צרכנים ללא גישה לשפדן, שכן החיסכון בהשקיה עבור צרכנים אלו גבוה מתוספת המים פר דונם כתוצאה ממילימטר גשם (מילימטר גשם אחד לדונם משול למטר מעוקב של מים). ישנם מספר גורמים העשויים להביא לפערים בין הביקוש למי שפדן ולמים שפירים בהתייחס למידת ההשפעה של שינויים בטמפרטורה ובמשקעי האביב. ראשית, מלאי שפדן מוגבל ותלות גבוהה במכסה מצמצמים את מידת ההשפעה של גורמים אחרים על הביקוש. שנית, יתכן וקיימת העדפה להפניית מים שפירים להשקיית מטעים בעונת האביב עקב רגישות לרמות מליחות השפדן (ע"פ ד"ר אפי טריפלר). גורם שלישי הוא גמישות הביקוש של המים השפירים במחיר המים השפירים. כשם שהביקוש רגיש לשינויים מחיר הוא יכול להיות רגיש יותר לשינויים בתנאי גידול באופן יחסי לשפדן. חוסר היכולת שלנו למצוא הבדלים בין קבוצות צרכנים עם וללא אלטרנטיבה אחרת להשקיה בשפירים, יכולה לנבוע מכך שהבחירה האקסטנסיבית להשקיה (בעל או שלחין) רגישה לשינויים גם בתנאי הגידול ומשנה בעיקר את רמת הצריכה בשפירים ולא בשפדן.

בעוד שכיוון ההשפעות של הטמפרטורה ומשקעי טרום-העונה מתיישב עם הספרות החקלאית הקיימת, ממצא מפתיע שהתגלה במחקר הנוכחי הינו הקשר החיובי בין משקעים בשלהי עונת ההשקיה (ספטמבר-אוקטובר) לבין היקף צריכת מי שפדן. נמצא כי כל מילימטר נוסף של גשם בתקופת הסתיו מעלה את הביקוש לשפדן לאותה שנה קלנדרית ב-1.04 אלמ"ק, תוספת שוות-ערך ל-0.17 מ"ק לדונם. למרות היעדר תיעוד מפורש לתופעה זו בספרות, התייעצויות עם חוקרים וחקלאים (ד"ר אפי טריפלר, פרופ' שוקי סרנגה, עוזי נפתליהו) העלו שתי השערות עיקריות: הראשונה נוגעת לעדיפות לשפדן בהשקיית גידולי שדה בחורף, בשילוב טכניקת "השקיה בגשם" שנועדה לשמור על רמות חנקן באזור השורשים לאחר שגשמים דוחקים אותו כלפי מטה. השערה שנייה קשורה באפשרויות התכנון החקלאי והקצאת הקרקע לגידולים, כאשר גשם בסתיו עשוי להתרחש בשנים נדירות שבהן החורף מתחיל מוקדם יחסית או מתאפיין בכמות משקעים גבוהה: לדוגמה, 2015 ו-2018 בלטו מעל יתר השנים במחקר, עם תיעוד מינימלי של 40 מ"מ ו-20 מ"מ גשם בהתאמה, בעוד ביתר השנים לא נרשמו משקעי סתיו משמעותיים. ייתכן שגשמים מוקדמים מאפשרים לחקלאים לשנות את חלוקת הקרקע בין הגידולים – בין אם במעבר לגידולי שלחין בזכות פוריות מוגברת של הקרקע, ובין אם בהוספת מחזור גידולים נוסף המתאפשר כתוצאה מחורפים מוקדמים או ארוכים מהממוצע.

מגבלות והשלכות המחקר

מחקר זה הושפע משלוש מגבלות, הראשונה נוגעת לתיעוד צריכת המים השוליים. בעוד שמלאי המים השפירים מנוהל על בסיס מלאי מים שפירים בתחילת כל שנה, תיעוד השימוש במי קולחים המבוסס על מלאי שפכים יציב, מורכב יותר. מורכבות זו נובעת מהעובדה שפריסת מפעלי ההשבה המקומיים לטיפול שניוני ושלישוני בשפכים באופן שוטף, מאפשרת גמישות באספקה וגישור על מחסור במפעל השבה אחד באמצעות אספקה ממפעל השבה אחר. גמישות זו מקשה על זיהוי מגבלת שימוש במי קולחים. חסרון זה הוביל אותנו להתמקד במי שפדן כמקרה פרטי של מקור מים שוליים ממפעל טיהור אקסקלוסיבי עם מכסה שנתית קשיחה. גם בתוך המדגם המצומצם, נאלצנו להתמודד עם אתגר הנגישות למים שוליים אחרים. חלק מצרכני השפדן הם גם צרכני קולחים או מליחים, ללא מגבלה בפועל על צריכת מקורות אלו. במהלך המחקר ביצענו אמידה נפרדת של שלוש קבוצות צרכנים בניסיון לזהות הבדלים ביחס לצריכת שפדן, אך לא נמצאו דפוסים מובהקים. דרך נוספת להתמודד עם סוגייה זו הייתה באמצעות שימוש במכסת השוליים הנוספים כמשתנה נוסף במשוואת הביקוש למי שפדן ולמים שפירים.

המגבלה השנייה נוגעת למתודולוגיה. השימוש בשיטה הא-פרמטרית מתבסס על הנחה של היעדר צריכה אפסית. במקור, האמידה האמפירית של Blomquist & Newey (2000) הכירה במגבלה זו בשוק העבודה ועבודתם האמפירית כללה התאמה מלאכותית של הנתונים למודל התיאורטי. בעוד שהנחת הצריכה האפסית תואמת ביקוש למים ביתיים (Nauges & Blundell, 2001), היא בעייתית בהקשר החקלאי, שכן חקלאים יכולים לבחור בגידולי בעל ולהימנע לחלוטין מצריכת מים להשקיה או להפנות מים שפירים לצרכי גינון ותיירות. בפועל, לא הנחנו הנחה זו אבל כן התאמנו את בסיס הנתונים על ידי הכללה של צרכנים עם צריכת מים מעל רמה מינימאלית, בדומה לשימוש של Finkelshtain et al. (2020), ולשימוש המקורי של Blomquist & Newey (2000) בשוק עבודה עם שיעורי אבטלה מבניים נמוכים. הממצאים ברמת הישובים החקלאים משקפים את ההתנהגות הממוצעת של החקלאים ביישוב בבחירת הכמות הנצרכת של מי השקיה, כאשר קבוצה זו כוללת גם את החקלאים שבחרו להשקות וגם את אלו שבחרו לא להשקות כיוון שעבורם ערך התפוקה השולית נמוך ממחיר המים.

מגבלה שלישית היא חוסר באפיון מלא של התחלופה בין מקורות המים, כזה שמצריך זיהוי של יחס התפוקות השוליות של מקורות המים. בניגוד למודל מבני, הגישה הא-פרמטרית לא מניבה תוצאות המאפשרות לחשב ערכי תפוקה שולית עבור צרכני מים שצריכתם נקבעת על פי המכסה מכאן שרמת הניתוח שלנו את ההשפעות הצולבות של מחירים ומכסות על הביקוש הצולב הינה חלקית. מחקרי המשך שיעסקו בסוגיית יחס התחלופה השולי-טכני או בניתוח דומה ברמת החקלאי ולא ברמת היישוב יוכלו לשפוך אור נוסף על רווחת החקלאים והגורמים המשפיעים על הביקוש המלא למי השקיה בחקלאות.

על אף המגבלות שהוצגו לעיל, אנו עדים למודל חיזוי איכותי לצריכת שפדן כפי שהוצג בפרק מדדי טיב ההתאמה. מודל זה מספק בסיס אמפירי להערכת ההשפעות של הרחבת תשתית השפדן על החקלאות. בהתאם לכך, ממצאי המחקר מצביעים על כך שמדיניות ניהול הביקוש למי השפדן צריכה להתבסס על ניהול מנגנוני המכסות והמחירים. הסימולציות לתרחישי 2050 מראות כי גידול טבעי בביקוש למי שפדן מצריך תמיכה מצד הגדלת

המכסות. מבחינה רגישות לסט מחירי המים מראים כי הפער בין מחירי המקורות השונים מהווה מנגנון השפעה מורכב על דפוס הביקוש לשפדן, דבר המעיד על כך שניהול הביקוש בידי קובעי המדיניות יכול להתבצע הן דרך שינויים בתעריפי השפדן והן דרך שינויים בתעריף הבסיס של המים השפירים. מודל החיזוי מאפשר את הצגת האומדן לעודף רווחת החקלאים בערכו הנוכחי, הנגזר מהרחבת היצע והביקוש למי השפדן. רכיב זה מהווה נדבך נוסף בתועלת החברתית של השימוש המוגבר במים מושבים, אשר לא נכלל בתחשיבי כדאיות ההשקעה עד כה.

מסקנות

עבודתנו מציגה ניתוח ביקוש חקלאי למי השקיה ממקורות שונים. למיטב ידיעתנו אנו מיישמים לראשונה מודל בחירה בגישה א-פרמטרית בהיבט היצרני-חקלאי ומבצעים ניתוח נפרד לכל מקור מי השקיה. להבדיל ממודלים של נראות מקסימאלית שיושמו בספרות הכלכלית-חקלאית, המודל שאנו מפעילים הינו פשוט ליישום ולא מצריך הנחות מבניות לגבי משוואת הביקוש והתפלגות שגיאת האמידה. שילוב של הגישה הא-פרמטרית עם משתנה הפרש המייצג את הסובסידיה הגלומה במחירי מדרגות, סייע לנו לאמוד את משוואת הביקוש למים שפירים וקולחים להשקיה.

הביקוש למים השפירים מציג גמישויות בטווח מוכר שהתקבל במחקרים קודמים, כאשר רגישות הביקוש לשינויי מחיר גבוה והרגישות לשינויים במכסה נמוכה. מאפיון הביקוש לשפדן כמקור מי השקיה קולחים, מתקבלת תלות גבוהה במכסה השנתית לצד גמישות נמוכה לשינויי מחיר, כאשר מרבית הצרכנים מנצלים את רוב מכסתם השנתית. גמישות הביקוש ביחס למחיר אינה קשיח לחלוטין, מה שמעיד על קיום קבוצת צרכנים שעבורם ערך התפוקה השולית של מי שפדן כן זהה למחירו. עם זאת הממצאים לפיהם שינויי מחיר משפיעים באופן מתון על הביקוש מצביעים על כך שבממוצע, התועלת הכלכלית מכל קוב שפדן גבוהה מעלותו הנוכחית.

ההשקעה בהרחבת משק הקולחים והשאיפה לביטחון מזון עתידים להביא לשולחן מקבלי החלטות יוזמות לשינויים במחירי הקולחים בכלל ומי השפדן בפרט, במטרה לעודד צריכה או לשאת במימון ההשקעה. ייתכן ויש מקום לעידוד השימוש במי קולחים מטיפול שניוני ושלישוני באמצעות סבסוד, במיוחד עבור חקלאים שאינם ממצים את כלל מכסתם השנתית, או שביכולתם לבצע המרה של מכסות שפירים בקולחים וטרם עשו זאת. המחקר מראה כי באשר למי השפדן, אין הצדקה בתמריץ כלכלי לעידוד צריכתו. יתרה על כך, בשנים האחרונות חלה עלייה בתעריף מי השפדן לצרכן החקלאי. בהינתן ומגמה זו משקפת את הצורך במימון הרחבת ההיצע, ממצאי המחקר מצביעים על תמיכה בהמשכיות מדיניות זו מתוך הבנה כי הגדלת ההיצע תתרום באופן משמעותי לרווחת החקלאים.

הביקוש למי שפדן והביקוש למי שפירים אשר נותחו במאמר זה מציגים רמזים על תחלופה גבוהה בין המקורות, תחלופה זו באה לידי ביטוי בגדילה טבעית בביקוש למי שפדן וצמצום הביקוש למים שפירים, השפעות צולבות של שינויים במכסה, השפעות חיוביות של פער המחירים ואפקט ההכנסה על הביקוש לשפדן. יחד עם זאת, מאמר זה אינו מציג במפורש את יחס התחלופה השולי-טכני בין המקורות על כן כל מסקנה בדבר יחס התחלופה צריכה להתבסס על מחקר עתידי מתאים.

1. Bar-Shira, Z., Just, R. E., & Zilberman, D. (1997). Estimation of Farmers' Risk Attitude: An Econometric Approach. *Agricultural Economics*, 17(3), 211-222.
2. Bar-Shira, Z., & Finkelshtain, I. (2000). The Long-Run Inefficiency of Block-Rate Pricing. *Natural Resource Modeling*, 13(4), 471-493.
3. Bar-Shira, Z., Finkelshtain, I., & Simhon, A. (2006). Block-rate versus uniform water pricing in agriculture: An empirical analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(4), 986-999.
4. Bar-Shira, Z., Cohen, N., & Kislev, Y. (2007). The Demand for Water in the Municipalities. The *Economic Quarterly*, 54(2), 179-203.
5. Billings, R., & Agthe, D. (1980). Price elasticities for water: A case of increasing block rates. *Land Economics*, 56(1), 73-84.
6. Binswanger, H. P., & Sillers, D. A. (1983). Risk aversion and credit constraints in farmers' decision-making: A reinterpretation. *The Journal of Development Studies*, 20(1), 5-21.
7. Blomquist, S., & Newey, W. (2000). Nonparametric estimation with nonlinear budget sets. *Working paper*, Uppsala University, Sweden.
8. Boland, J. I., & Whittington, D. (1998). The political economy of increasing block tariffs in developing countries. *International Development Research Centre*.
9. Burtless, G. & Hausman, J. 1978. The Effect of Taxation on Labor Supply: Evaluating the Gary Negative Income Tax Experiment. *Journal of Political Economy* 86(6): 1103-30.
10. Cameron, A. C., Gelbach, J. B., & Miller, D. L. (2007). Bootstrap-based improvements for inference with clustered errors. *NBER Technical Working Paper*, 344.
11. Cohen, S., Ianetz, A., & Stanhill, G. (2002). Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. *Agricultural and Forest Meteorology*, 111(2), 83-91.
12. Colby, E., & Bair, E. (2013). Cross-validation for nonlinear mixed effects models. *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*, 40(3), 243-252.
13. Dahan, M., & Nisan, U. (2007). Unintended consequences of increasing block tariffs pricing policy in urban water. *Water Resources Research*, 43(3), W03402.
14. Finkelshtain, I., Kan, I., & Rapaport-Rom, M. (2020). Substitutability of freshwater and non-freshwater sources in irrigation: An econometric analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, 102(4), 1105-1134.

15. Goren, O., Burg, A., Gavrieli, I., Negev, I., Guttman, J., Kraitzer, T., Kloppmann, W., & Lazar, B. (2014). Biogeochemical processes in infiltration basins and their impact on the recharging effluent, the soil aquifer treatment (SAT) system of the Shafdan plant, Israel. *Applied Geochemistry*, 48, 58-69.
16. Government of Israel. (2024). Decision No. 2343: National Food Security Plan. *Office of the Prime Minister*. Published on November 4, 2024.
17. Greven, S., & Kneib, T. (2010). On the behaviour of marginal and conditional AIC in linear mixed models. *Biometrika*, 97(4), 773-789.
18. Helfer, F., Lemckert, C., & Zhang, H. (2012). Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 365-378.
19. Hewitt, J. A., & Hanemann, W. M. (1995). A discrete/continuous choice approach to residential water demand under block rate pricing. *Land Economics*, 71(2), 173-192.
20. Israel Water Authority. (IWA). Water consumption and quota archive.
21. Israel Water Authority. (IWA). General water tariffs archive.
22. Israel Water Authority. (IWA). The Wastewater System 2050: Proposed Actions to Increase the Supply of Recycled Water, Optimize Its Use, and Reduce Costs for Agriculture. Jerusalem: March 2023.
23. Amendment to the Water Law No. 27. 2017. Proceedings of the 20th Knesset, 198th session, January 30, 2017.
24. Israel Meteorological Service (IMS).
25. Central Bureau of Statistics. (CBS). Settlements in Israel: Demographic and statistical data.
26. Israel Ministry of Agriculture and Rural Development (IMA). 2024. Nohal Water 2024: Support Guidelines for Agricultural Water Consumers.
27. Israel Ministry of National Infrastructures (IMNI). 1959. *Water Law*.
28. Israel Ministry of National Infrastructures (IMNI). 2018. *Water Regulations (Standards for Allocating Water for Agriculture)*, 2018.
29. Kapara, I. (2024). Impact of extreme weather events on mango (*Mangifera indica* L.): Economic analysis for the case of Israel. The Hebrew University of Jerusalem, Robert H. Smith Faculty of Agriculture, Food & Environment.
30. Kislev, Yoav 2011. The Water Economy of Israel. *Taub Center for Social Policy Studies in Israel*. Policy Paper No. 2011.15.
31. Kurtzman, D., & Kadmon, R. (1999). Mapping of temperature variables in Israel. *International Journal of Climatology*, 19(1), 55-64.
32. Martinez-Españeira, R., 2002b. Residential water demand in the Northwest of Spain. *Environmental and Resource Economics* 21 (2), 161–187.

33. Mekorot. (2023). Water Supply Report 2023 (דו"ח אספקת מים). Engineering and Technology Division / Water Resources Quality Unit. Israel National Water Company.
34. Moffitt, R. (1986). The econometrics of piecewise-linear budget constraints: A survey and exposition of the maximum likelihood method. *Journal of Business & Economic Statistics*, 4(3), 317-328.
35. Naftaliahu, U. (2024, November 23). Personal communication.
36. Nauges, C., & Blundell, R. (2001). Estimating residential water demand under block rate pricing: A nonparametric approach. LEERNA-INRA, Toulouse and University College London.
37. Nauges, C., & Thomas, A. (2000). Privately operated water utilities, municipal price negotiation, and estimation of residential water demand: The case of France. *Land Economics*, 76(1), 68-85.
38. Nordin, J. (1976). A proposed modification of Taylor's demand analysis: Comment. *The Bell Journal of Economics*, 7(2), 719-721.
39. Olmstead, S. M. (2009). Reduced-Form Versus Structural Models of Water Demand Under Nonlinear Prices. *Journal of Business & Economic Statistics*, 27(1), 84-96.
40. Rothenberg, B., & Zadik, A. (2020). Comparison of Urban Water Prices in Israel and Developed Countries (Hebrew). *Research and Information Center, The Knesset*.
41. Sandmo, A. (1971). On the Theory of the Competitive Firm Under Price Uncertainty. *The American Economic Review*, 61(1), 65-73.
42. Slater, Y., Finkelshstein, I., Reznik, A., & Kan, I. (2020). Large-scale desalination and the external impact on irrigation-water salinity: Economic analysis for the case of Israel. Water Resources Research.
43. State Commission of Inquiry on the Management of Israel's Water Sector. (2010). *Report of the Commission of Inquiry: Challenges and Recommendations for Water Management in Israel*. Haifa, March 2010.
44. Tripler, E. (2024, November 20). Personal communication.
45. Zelingher, R., Ghermandi, A., De Cian, E., Mistry, M., & Kan, I. (2019). Economic impacts of climate change on vegetative agriculture markets in Israel. *Environmental and Resource Economics*, 74(3), 679-696.

נספח א' – משתני הסובסידיה ואיברי הפולינום

איברי בסיס לפיתוח הפולינום אשר מתארים את רמות הסובסידיה על המים תוארו בביטויים מתמטיים של סט המכסות והמחירים היוצרים מערכת מחיר מדורגת עם שלושה תעריפים. ביטויים אלו נוסחו באופן דומה לניסוח משתני ההפרש של (Nauges & Blundell (2001).

מכפלת פער המחירים בין המדרגה האמצעית לתחתונה ומכסת הצריכה השנתית יוצר את ערך הסובסידיה sb_1 .

$$sb_1 = (p_{f2} - p_{f1}) \cdot q_{f1} \quad 1.$$

הוספת מכפלת פער המחירים בין המדרגה העליונה לאמצעית, בסכום של המכסות (מכסת צריכה שנתית + מכסת חריגה של 30%) יוצרת ערך סובסידיה נוסף sb_2 .

$$sb_2 = sb_1 + (p_{f3} - p_{f2}) \cdot (q_{f1} + q_{f2}) \quad 2.$$

לשם צמצום ערך קריטריון ה-CV באמידת הביקוש למים שפירים, נוספו מכפלת מכסת שפירים בפער בין ערכי הסובסידיה ומכפלת משתנה דמי לגישה לשפדן בסובסידיה כוללת, אשר מתוארות במשוואות (3) ו-(4) בהתאמה:

$$q_{f1} \cdot \Delta sb = q_{f1}(sb_1 - sb_2) \quad 3.$$

$$S_{access} \cdot sb_2 \quad 4.$$

לשם צמצום ערך קריטריון ה-CV באמידת הביקוש למי שפדן, נוספו ריבוע פערי המחיר בין שפדן לשפירים במדרגה התחתונה ומכפלת מכסת שפדן בפער בין ערכי הסובסידיה, אשר מתוארים במשוואות (5) ו-(6) בהתאמה:

$$(p_s - p_{f1})^2 \quad 5.$$

$$q_s \cdot \Delta sb = q_s(sb_1 - sb_2) \quad 6.$$