

השפעת הירידה של מחיר ההון החדשני על המחירים

ועל חלק העבודה בתוצר

רוני פריש¹

תקציר

מחקרים מלמדים שהגידול בהון חדשני הקטין את הביקוש לעובדים המבצעים מטלות רוטיניות. מחקר זה בוחן את השפעת הירידה החדה במחיר ההון החדשני על המחירים ועל חלק העבודה בתוצר. זאת בעזרת מודל מקרו-כלכלי למשק פתוח שבו ההון החדשני הוא תחליפי לעבודה. המודל מלמד שירידת מחיר ההון החדשני-תחליפי פועלת להגדלת התפוקה השולית של העבודה ולעליית השכר. בהינתן שהמגזר הסחיר הוא המגזר העתיר בהון חדשני, ירידה במחיר ההון התחליפי גוררת התייקרות של המוצרים הלא-סחירים. המודל כויל לנתונים בהתבסס על ההנחה שההון התחליפי במודל זהה להון מסוג ICT (הכולל מחשבים, תוכנות וציוד טלקומוניקציה). אומדני הסימולציה הם שהגידול בשימוש בהון חדשני פעל לירידה בסדר גודל של 3 נקודות אחוז בחלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר, ולירידה של כ-0.7 נקודות אחוז בחלק העבודה בתוצר של המגזר הלא-סחיר.

1. עיקרי הדברים

מחקר זה בוחן את השפעת ההוזלה של מחירי ההון החדשני והשיפור באיכותו על התפתחות מחירי המוצרים והשירותים במדינות השונות. מחירו של הון ICT – הכולל מחשבים, תוכנות וציוד טלקומוניקציה – ירד בין השנים 1995 ו-2015 בכ-50%, והשימוש בו גדל מאוד. ישנה תמימות דעים שההון החדשני דחק עובדים שהועסקו במטלות רוטיניות ושחק את שכרם הריאלי, אך כיצד הוא משפיע על המחירים במשקים השונים? האם השימוש הגובר בהון חדשני הוזיל את עלויות הייצור ואת המחירים? וכיצד הוא השפיע על חלק העבודה בתוצר?

לאורך שנים רבות לא גרם תהליך הצבר ההון לירידת חלק העבודה בתוצר משום שההון המסורתי לא רק החליף עובדים אלא גם השלים אותם. בעבר קיזזו שתי ההשפעות הללו (התחלופה וההשלמה) זו את זו, אך ההשערה הרווחת היא שההון החדשני מתאפיין בהשפעת תחלופה גדולה יותר (בהשוואה להון הלא-חדשני). Acemoglu and Restrepo (2018) הציגו מודל מקרו-כלכלי שבמרכזו הון חדשני שיש לו השפעת תחלופה בלבד, ושביכולתו להחליף עובדים במגוון משימות הולך וגדל. המודל שלהם חשף את העובדה שגם במקרה כזה ישנם אפקטים מקזזים הפועלים לעליית השכר. מחקרים אמפיריים מצביעים על כך שבעשורים האחרונים חלה ירידה בחלק העבודה בתוצר. ירידה זו התרחשה בעיקר במשלחי יד רוטיניים הניתנים להחלפה על ידי הון חדשני. Eden and Gagli (2018) העריכו שתהליכי אוטומטיזציה מסבירים מחצית מהירידה בחלק העבודה בתוצר של ארה"ב.

מאמר זה מציג מודל מקרו-כלכלי למשק פתוח שבו פועלים שני מגזרי ייצור – סחיר ולא-סחיר – שכל אחד מהם משתמש בשלושה גורמי ייצור: עבודה, הון מסורתי והון חדשני. מודל זה הוא

¹ ברצוני להודות לפרופסור יוסף זעירא על הנחייתו המסורה. כמו כן אני מודה לדוקטור קובי ברוידא, לדוקטור יניב ידיד-לוי ולשופט האנונימי מטעם הרבעון לכלכלה על הערותיהם המועילות.

ורסיה חדשה למודל הקלאסי שפיתחו Balassa (1964) ו-Samuelson (1964), אשר היטיב להסביר את התפתחות המחירים במדינות השונות.² החידוש כאן הוא בהוספת גורם ייצור נוסף – הון חדשני, המתאפיין בהשפעת תחלופה גדולה מזו של ההון המסורתי. יתר הנחות המודל דומות לאלו של המודל הקלאסי: יש מסחר בינלאומי בשני סוגי ההון (המסורתי והחדשני) ובמוצרים הסחירים, אך אין מסחר בינלאומי בעבודה ובמוצרים הלא-סחירים. היצע העבודה קשיח לחלוטין. הפירמות לוקחות את כל המחירים כנתונים ופועלות במטרה למקסם רווח. מנגנון הפעולה של המודל הקלאסי יתייחס גם כן: עלייה בפריזון הכולל (TFP) של המגזר הסחיר יגרור עלייה בשכר, עליית השכר במשק תייקר את עלויות הייצור של המגזר הלא-סחיר ותביא להתייקרות מחירי הלא-סחירים. כאמור, השוני הוא בהכללת ההון חדשני, המתאפיין ביכולת משופרת להחליף עובדים (בהשוואה להון המסורתי), בפונקציות הייצור של שני המגזרים;³ לכן כל שינוי טכנולוגי המשפר את יכולתו של הון תחליפי-חדשני זה לבצע משימות שבוצעו בעבר על ידי עובדים, כמו גם ירידת מחירו, יגדילו את השימוש בו בשני מגזרי הייצור. פתרון המודל יתאר את הקשר שבין השינוי במחירים בשווקים הבינלאומיים – ובכלל זה השינוי במחיר ההון התחליפי-חדשני – לבין השינוי במחירים בכלכלה המקומית והתפתחות חלק העבודה בתוצר בה.

המודל מלמד שהשפעת הירידה במחיר ההון התחליפי-חדשני על המחירים הלא-סחירים תלויה בפרמטרים הקובעים את עתירות השימוש בהון חדשני במגזר הסחיר ובמגזר הלא-סחיר. בהינתן שהמגזר הסחיר הוא המגזר העתיר בהון זה, כפי שמתקיים בפועל, ירידה במחיר ההון החדשני גוררת התייקרות של המוצרים הלא-סחירים. ואולם, אם המגזר הלא-סחיר יהיה בעתיד המגזר העתיר בהון תחליפי-חדשני אזי ירידת מחיר ההון החדשני תגרור את הוזלת המוצרים הלא-סחירים.

סעיף 5 מציג כיול של המודל לנתונים בפועל. כיול המודל מניח שההון התחליפי במודל זהה להון ICT בנתונים. נבחרו ערכים לפרמטרים כך שיחס ההון החדשני – היחס שבין הון ה-ICT לסך מלאי ההון – שיתקבל במודל יהיה זהה לזה שבנתונים. סימולציה של המודל המכיל מלמדת שירידת מחיר ההון החדשני העצימה את השימוש בו. ככל שגמישות התחלופה בין ההון החדשני לעבודה גבוהה יותר ניתן לזקוף חלק גדול יותר מהגידול בהון החדשני לירידת מחירו, וחלק קטן יותר לשיפור ביכולתו לבצע משימות יצרניות. ואולם, ללא תלות בגמישות התחלופה שנבחרה, נמצא שהכפלת משקל ההון החדשני במלאי ההון (במונחים נומינליים) יכולה להסביר ירידה בסדר גודל של כ-3 נקודות אחוז בחלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר, וירידה של 0.7 נקודות אחוז בחלק העבודה בתוצר של המגזר הלא-סחיר. אומדנים אלו רגישים להנחות שנבחרו.

סדר הדברים בהמשך הפרק: סעיף 2 מציג סקירת ספרות; סעיף 3 מציג סטטיסטיקה תיאורית; סעיף 4 מציג מודל הכולל שני מגזרים (סחיר ולא-סחיר) ושלושה גורמי ייצור: עבודה, הון, והון המחליף עבודה (הון חדשני); סעיף 5 מציג כיול של המודל לנתונים, וסעיף 6 מסכם.

² המודל מסביר את התפתחות המחיר היחסי של מדינה אחת בהשוואה לאחרת, כאשר המחירים בכל המדינות נמדדים באותו מטבע. המודל אינו מסביר את התפתחות המחירים במונחי המטבע המקומי (כלומר אינפלציה).

³ המודל מניח שפונקציות הייצור של שני המגזרים הן מסוג nested CES, בקן הפנימי הון ICT ועבודה, ופונקציה זו מוכללת בפונקציית קוב-דגלאס שכוללת הון המסורתי ואת הקן הפנימי (שבו הון ICT ועבודה, כאמור).

2. סקירת ספרות

Zeira (1998) הציג מודל צמיחה מקרו-כלכלי שבו מתקיים תהליך של תחלופה בין הון חדשני לעבודה, והראה שאימוץ הטכנולוגיה החדשה מקטין את הביקוש לעובדים במגזר המאמץ, אך מגדיל את הביקוש לעובדים במגזרים האחרים. לפיכך, המוטיבציה להמשיך ולאמץ טכנולוגיה מחליפת עבודה אינה דועכת. Acemoglu and Restrepo (2018) נסמכו על Zeira (1998) והציגו מודל שבו השיפור הטכנולוגי מתבטא בכך שההון מחליף עובדים במגוון הולך וגדל של משימות. פתרון שיווי משקל מקרו-כלכלי מלמד שהשינוי הטכנולוגי יוצר אפקטים אנדוגניים המקזזים את הירידה בביקוש לעבודה, אך אפקט התחלופה נותר דומיננטי; כך שחלק העבודה בתוצר קטן. מחקרים אמפיריים מצביעים על כך שההשפעה הראשונית של אימוץ הון חדשני פועלת לדחיקת עובדים המועסקים בתהליכי ייצור רוטיניים במגזר הסחיר ולהגדלת הפיריון בו – Acemoglu and Restrepo (2020); Graetz and Michaels (2018); Dinlersoz and Wolf (2018). אך אין הסכמה לגבי השפעתה על התעסוקה הכוללת במשק בפועל. Gregory et al. (2022) אמדו את ההשפעה של שיפור ביכולות של מכונות מחליפות עבודה רוטינית על היקף התעסוקה באיחוד האירופי. הם מצאו שמכונות החליפו באופן ישיר כ-9.4 מיליון עובדים בשנים 1999–2010. ואולם, בעקבות תהליכים אלו נוצרו כוחות שפעלו להגדלת הביקוש לעובדים כך שההשפעה נטו הייתה חיובית. מנגד, מצאו Eden and Gaggl (2018) שהירידה הניכרת במחירי ההון ICT מסבירה כמחצית מהירידה בחלק העבודה בתוצר בארה"ב במהלך השנים 1967–2013. שאלת המחקר של Eden and Gaggl (2018) דומה לזו של מחקר זה; ואולם הם התמקדו במשק האמריקאי, ולכן המודל שלהם מתאר משק סגור עם מגזר ייצור יחיד, בעוד שהמודל שיוצג כאן יתמקד בכלכלה פתוחה עם שני מגזרי ייצור (סחיר ולא-סחיר).⁴

3. סטטיסטיקה תיאורית

הנתונים בסעיף זה (ובסעיף 5) מבוססים על קובץ Klems שהתפרסם בנובמבר 2019 ומכיל נתונים ל-30 מדינות (מדינות האיחוד האירופי, ארה"ב, יפן ובריטניה) לשנים 1995 עד 2017.⁵ הקובץ כולל את כל הנתונים הדרושים לאמידת פונקציית ייצור ברמת הענף; בפרט, הקובץ מבחין בין הון חדשני (ICT) להון אחר בכל ענף וענף.⁶ קיבצתי את הענפים לפי מגזר. במגזר הסחיר נכללו ענף התעשייה

⁴ המודל של Eden and Gaggl (2018) כולל שני סוגי הון: הון ICT (חדשני) והון אחר (שאיננו חדשני) ושני סוגי עבודה: עבודה רוטינית ולא רוטינית. הם אמדו את גמישויות התחלופה בין גורמי הייצור (בעזרת רגרסיות) ומצאו שגמישות תחלופה בין הון ICT לבין עבודה רוטינית גדולה במיוחד (בראשית התקופה היא הייתה גדולה מ-2 ובסוף התקופה היא הגיעה ל-3.3). הם כיילו את הפרמטרים של המודל בהתאם וחישבו את השפעת הירידה במחירי ההון ICT על חלק העבודה בתוצר.

⁵ הנתונים הורדו מהאתר <https://www.rug.nl/ggdc/productivity/eu-klems>. מדובר בפרויקט בינלאומי שנועד לייצר אחידות במדידת התפוקות, גורמי הייצור והתשומות ולמדוד באופן מדויק ומפורט את התרומות של כל אחד מגורמי הייצור לתפוקה, ולכן גם את הפיריון הכולל (שארית סולו). תיאור מפורט של הפרויקט מופיע אצל O'Mahony and Timmer (2009). תיאור נוסף מופיע בדו"ח של מכון המחקר של וינה: The Vienna Institute for International Economic Studies, שפורסם בשנת 2019 ומופיע ברשימת המקורות.

⁶ הקובץ כולל נתונים על כל 28 מדינות האיחוד האירופי, אך עבור 7 מהן אין נתונים על מלאי ההון ברמת הענף; לחלק מהמדינות האחרות היו נתונים חסרים. נתונים מפורטים על מלאי ההון ICT (הכולל מחשבים, תוכנות וציוד טלקומוניקציה) משנת 1997 ואילך קיימים עבור 18 מדינות, אך 4 מהן הושמטו, משום שחסרו עליהן נתונים חיוניים אחרים לאמידת פונקציית ייצור. התקופה הנחקרת מסתיימת ב-2015, משום שעבור חלק מהמדינות חסרו נתונים לשנים 2016 ו-2017.

(Manufacturing), אשר סווג ככ בכל המחקרים; ענף מידע ותקשורת (Information and Communication), אשר מוין כסחיר גם אצל Gubler and Sax (2019); וענף הפיננסים (Financial and Insurance Activities), שמוין ככ בעקבות השינוי הטכנולוגי בתקשורת מחשבים מראשית שנות ה-90, שהפך אותו להרבה יותר סחיר. במגזר הלא-סחיר נכללו ענף הבנייה (Construction), ענף המסחר וקמעונאות (Wholesale and Retail Trade), ענף תחבורה ואחסנה (Transportation and Storage), ענף שירותי אירוח ואוכל (Accommodation and Food Service Activities) וענף תיקון כלי רכב (Repair of Motor Vehicles and Motorcycles).⁷

נתוני Klems מלמדים שהגידול במלאי ההון מסוג ICT מהיר בהרבה מהגידול במלאי ההון האחר – חלקו של ההון מסוג ICT בסך ההון הוכפל במהלך השנים 1995 עד 2015. לוח 1 מציג את חלקו של מלאי ההון ICT בסך מלאי ההון, בנפרד לכל אחד משני המגזרים בכל אחת מ-14 המדינות בשנים 1995 ו-2015 (באחוזים), וכן את הממוצע הפשוט ל-14 המדינות. בכל המדינות המגזר הסחיר הוא המגזר עתיר ההון ICT: משקל ההון ICT במלאי ההון של המגזר הסחיר גדול יותר ממשקלו במגזר הלא-סחיר (למעט בגרמניה ובהולנד בשנת 1995). בכל אחת מהמדינות ובכל אחד משני המגזרים גדל חלקו של מלאי ההון ICT במלאי ההון במידה ניכרת (חוץ מאשר במגזר הלא-סחיר של איטליה וצ'כיה). בממוצע, משקל ההון ICT במלאי ההון של המגזר הסחיר גדל במהלך השנים 1995 עד 2015 פי 2.2 (ל-13.9% בשנת 2015), וזה של המגזר הלא-סחיר גדל פי 2 (והגיע ל-5.0% בשנת 2015). נתון זה הוא הממוצע הפשוט של 14 המדינות.

לוח 1

משקל מלאי ההון ICT מתוך סך מלאי הון, לפי מגזר (1995 ו-2015), באחוזים (ממוצע של 14 המדינות)

6.3	מגזר סחיר 1995
13.9	מגזר סחיר 2015
2.5	מגזר לא-סחיר 1995
5.0	מגזר לא-סחיר 2015

המקור: נתוני Klems ועיבודי המחבר. הנתונים במחירים שוטפים. הענפים הסחירים כוללים: חרושת, מידע ותקשורת, פיננסים. הענפים הלא-סחירים כוללים: בנייה, מסחר, תחבורה, מלונאות ואירוח. המדינות שנכללו: אוסטרליה, בלגיה, צ'כיה, גרמניה, דנמרק, ספרד, פינלנד, צרפת, איטליה, יפן, הולנד, שוודיה, בריטניה וארצות הברית.

ממצא חשוב נוסף, המחייב להבדיל בין שני סוגי ההון, הוא ירידת המחיר היחסי של ההון החדשני בהשוואה למחיר ההון הכולל: כפי שניתן לראות בלוח 2, מחיר מלאי ההון החדשני (ציוד תקשורת, מחשבים ותוכנה) ירד בשיעור תלול בהשוואה למחיר ההון במהלך השנים 1995 עד 2015. שקלול של שלושת רכיבי ההון החדשני (ממוצע משוקלל) מצביע על ירידה של כ-51% ב-13 מ-14 המדינות. ירידה תלולה אף יותר נמדדה בארה"ב (כ-58%). סביר לשער שדווקא המדידה בארה"ב מדויקת יותר, ושבמדינות האחרות השינוי במחיר ההון החדשני מוטה כלפי מעלה בשל אומדן חסר של השיפור הגלום באיכות ההון החדשני.

⁷ ענפי השירותים הציבוריים כגון חינוך, בריאות ורווחה לא נכללו בחלוקה בשל הקושי לאמוד את ערך התוצר שלהם בשוק החופשי. ענף החקלאות לא נכלל משום שהפריון מושפע מזמינות הקרקע ואיכותה ומתנאי אקלים המשתנים מאוד משנה לשנה.

לוח 2

הירידה היחסית במחירי ההון החדשני בהשוואה למחיר ההון הכולל

IT - Computing equipment	CT - Communications equipment	Soft_DB - Software & Data Base	ארה"ב
-93%	-70%	-30%	
-69%	-54%	-2%	13 מדינות אחרות

המקור: נתוני KLEMS. מדד מחיר ההון (Gross Fixed Capital Formation) עלה ב-31% בארה"ב וב-33% במדינות האחרות. המשקלות של שלושת הרכיבים הם לערך: (Soft DB) 47%, (CT) 33%, (IT) 19%.

ממצא נוסף העולה מנתוני Klems נוגע לירידה של חלק השכר בתוצר: חלק השכר בתוצר המגזר הסחיר ב-14 המדינות הנבחרות (ממוצע פשוט) ירד ב-3.4 נקודות אחוז (ל-56.2% בשנת 2015), וחלק השכר במגזר הלא-סחיר ירד באותה התקופה ב-2.7 נקודות אחוז (ל-68.8%).⁸

4. מודל נאו-קלסי עם שני מגזרים ושני סוגי הון

המודל מתאר משק פתוח שבו שני מגזרי ייצור – סחיר (T) ולא סחיר (N) – כל אחד מהם משתמש בשלושה גורמי ייצור: עבודה (L), הון חדשני (M) והון שאינו חדשני (K). יש מסחר בין-לאומי בשני סוגי ההון ובמוצר הסחיר, אך אין מסחר בין-לאומי בעבודה ובמוצר הלא-סחיר. בכל אחד משני המגזרים פועלות פירמות רבות וזהות, הלוקחות את המחירים כנתונים. היצע העבודה קשיח לחלוטין, כל העובדים זהים, ויש מעבר עובדים חלק בין שני המגזרים. פתרון המודל יתאר את הקשר בין המחירים האקסוגניים – מחיר המוצר הסחיר (P_T), מחיר ההון המשלים (P_K) ומחיר ההון התחליפי (P_M) – הנקבעים כאמור בשוק העולמי, לבין הקצאת המקורות בכלכלה המקומית והמחירים האנדוגניים: השכר (W), ומחיר התוצר הלא-סחיר (P_N); זאת כפונקציה של הפרמטרים של פונקציית הייצור ושל הפירון הכולל של כל אחד משני המגזרים (A_N ו- A_T).

להלן אניח פונקציית ייצור מסוג CES, הכוללת תחלופה בין עבודה להון חדשני, המוכלת (nested) בפונקציית קוב-דגלס, שכוללת הון רגיל (לא-חדשני) ואת הרכיב המשותף (עבודה והון חדשני). זאת בדומה ל-DeCanio (2016) ול-Decker et al. (2017).⁹

פונקציות הייצור של המגזר הסחיר והלא-סחיר הן, בהתאמה:

$$1. Y_T = A_T \left[(1 - \theta) L_T^{\frac{(\sigma-1)}{\sigma}} + \theta M_T^{\frac{(\sigma-1)}{\sigma}} \right]^{\alpha\sigma/(\sigma-1)} K_T^{(1-\alpha)}$$

⁸ תוצאה זו רגישה להשמטת הנתון החרוג של ספרד. כאשר מתעלמים מספרד, הירידה בחלק העבודה בתוצר במגזר הלא-סחיר (3.6 נקודות אחוז) גדולה מהירידה בו במגזר הסחיר (2.9 נקודות אחוז).

⁹ הראשון (DeCanio) הניח פונקציית CES, שבה מתקיימת תחלופה בין עבודה לרובוטים, המוכלת בפונקציית CES נוספת, שבה יש תחלופה בין הרכיב המשותף (עובדים ורובוטים) להון רגיל. השני (Decker et al.) הניח פונקציית CES, שבה יש תחלופה בין רובוטים לעובדים בעלי רמת מיומנות נמוכה, המוכלת בפונקציית CES נוספת, שבה התחלופה היא בין הרכיב המשותף (עובדים לא-מיומנים ורובוטים) לעובדים בעלי מיומנות בינונית; כל אלה הם רכיב בפונקציית קוב-דגלס לצד עובדים מיומנים.

$$2. Y_N = A_N \left[(1 - \mu) L_N^{\frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}} + \mu M_N^{\frac{(\varepsilon-1)}{\varepsilon}} \right]^{\beta \varepsilon / (\varepsilon-1)} K_N^{(1-\beta)}$$

הפרמטר θ ידוע בשם פרמטר החלוקה. σ היא גמישות התחלופה. כאשר σ שואף לאפס אין כל תחלופה בין M ל- L בייצור המוצר הסחיר אלא פרופורציות קבועות, וכאשר σ שווה לאינסוף יש ביניהם תחלופה מלאה. במקרה זה ניתן לשמור על תפוקה קבועה באמצעות החלפת $\frac{\theta}{1-\theta}$ יחידות עבודה (L) ביחידה אחת של הון תחליפי (M) – קשר ליניארי.¹⁰ באופן כללי ניתן לשמור על תפוקה קבועה על ידי החלפת $\frac{\theta}{1-\theta} [L_T/M_T]^{1/\sigma}$ יחידות עבודה L ביחידה אחת של הון תחליפי M .

השימוש בפונקציות ייצור אלו מאפשר לבטא בצורה פשוטה יחסית תהליך שבו ההון החדשני מבצע מטלות נוספות שהתבצעו בעבר רק על ידי עובדים. תהליכים אלו יכולים לנבוע מגידול בפרמטר החלוקה – כלומר, משיפור אקסוגני באיכות ההון החדשני המאפשר לו להחליף עובדים במשימות נוספות, או מירידה אקסוגנית במחיר ההון החדשני המגדיל את כדאיות השימוש בו. באשר למשקולות של כל אחד מגורמי הייצור בתוצר: המודל מניח שחלק ההון המסורתי בתוצר של כל מגזר קבוע, אך הוא מאפשר שינוי בחלק העבודה בתוצר ובחלק ההון החדשני בתוצר (שכן גמישויות התחלופה אינן שוות בהכרח ל-1).

פונקציות הייצור הן מסוג תק"ל: הכפלת שלושת גורמי הייצור תכפיל את התפוקה.

נניח פחת מלא של ההון, ו- K ו- M נקבעים בתקופה הנוכחית, ומחירם משקף את דמי השכירות

¹¹. (Rental rate of capital)

הפירמות מקְמְרְבוֹת (maximize) את הרווחים. תנאי סדר ראשון (first order condition) של פירמה הפועלת במגזר הסחיר הם:

$$3. W = P_T \frac{dY_T}{dL} = (1 - \theta) P_T A_T \alpha \left[(1 - \theta) L_T^{((\sigma-1)/\sigma)} + \theta M_T^{((\sigma-1)/\sigma)} \right]^{\{\sigma\alpha/(\sigma-1)-1\}} K_T^{(1-\alpha)} L_T^{-1/\sigma}$$

$$4. P_M = P_T \frac{dY_T}{dM} = \theta P_T A_T \alpha \left[(1 - \theta) L_T^{((\sigma-1)/\sigma)} + \theta M_T^{((\sigma-1)/\sigma)} \right]^{\{\sigma\alpha/(\sigma-1)-1\}} K_T^{(1-\alpha)} M_T^{-1/\sigma}$$

$$5. P_K = P_T \frac{dY_T}{dK} = P_T (1 - \alpha) A_T \left[(1 - \theta) L_T^{((\sigma-1)/\sigma)} + \theta M_T^{((\sigma-1)/\sigma)} \right]^{\sigma\alpha/(\sigma-1)} K_T^{(-\alpha)}$$

נסדר מחדש את משוואה 5:

$$6. k_T = \left[\frac{P_T (1-\alpha) A_T}{P_K} \right]^{1/\alpha} \left[(1 - \theta) + \theta m_T^{(\sigma-1)/\sigma} \right]^{\sigma/(\sigma-1)}$$

$$\text{כאשר } m_T = \frac{M_T}{L_T}, k_T = \frac{K_T}{L_T}$$

¹⁰ במקרה זה, השכר (W) יהיה פרופורציוני למחיר ההון התחליפי $W = P_M [(1-\theta)/\theta]$.

¹¹ לחלופין ניתן להניח שהשקעות ההון (K ו- M) בוצעו בתקופה הקודמת, ומחיר ההון הוא מחיר רכישת ההון בתוספת הריבית העולמית, שהיא אקסוגנית: $P_K = V_K(1+r)$ ו- $P_M = V_M(1+r)$, ו- V_K ו- V_M מסמנים את מחירי הקנייה של ההון המשלים והתחליפי. לחלופין, אפשר להניח שההשקעות בוצעו בתקופה הקודמת, שאין פחת, ומחיר ההון שווה לריבית העולמית האקסוגנית כפול מחיר רכישת ההון: $P_K = rV_K$ ו- $P_M = rV_M$. ההנחה שההשקעות מבוצעות בו-זמן חוסכת פרמטרים לממד זמן.

ממשוואות 4 ו-5 נקבל את משוואה 7, שמתארת את קביעת m_T – יחס ההון התחליפי לעובד – במגזר הסחיר כפונקציה של המשתנים האקסוגניים:¹²

$$7. \quad m_T = [(V^{1-\sigma}\theta^{1-\sigma} - \theta)(1 - \theta)^{-1}]^{\sigma/(1-\sigma)}$$

$$V \equiv [A_T(1 - \alpha)^{(1-\alpha)}\alpha^\alpha]^{1/\alpha} \left(\frac{P_K}{P_M}\right) \left(\frac{P_T}{P_K}\right)^{1/\alpha}$$

נציב את m_T במשוואה 6 ונקבל את ההון לעובד במגזר הסחיר כפונקציה של המשתנים האקסוגניים. ממשוואות 3 ו-4 נקבל קשר בין השכר במגזר הסחיר – W_T – ליחס ההון התחליפי לעובד במגזר הסחיר.

$$8. \quad W_T = P_M[(1 - \theta)/\theta]m_T^{1/\sigma}$$

נציב את משוואה 7 במשוואה 8 ונקבל את השכר כתלות במשתנים האקסוגניים בלבד:

$$9. \quad W_T = P_M [V^{(1-\sigma)} - \theta^\sigma]^{1/(1-\sigma)} (1 - \theta)^{\sigma/(\sigma-1)}$$

נניח מעבר עובדים חופשי וחלק בין המגזר הסחיר ללא-סחיר, ולכן שכר זה (שנקבע, כאמור, במגזר הסחיר) הוא שכר שיווי-המשקל במשק.

מתנאי סדר ראשון של הפירמות הפועלות במגזר הלא-סחיר נובע שהיחס בין הנגזרת של התוצר הלא-סחיר לפי M ($\frac{dY_N}{dM}$) לנגזרת של התוצר הלא-סחיר לפי L ($\frac{dY_N}{dL}$) שווה ליחס בין מחיר ההון התחליפי לשכר, ומכאן שיחס ההון התחליפי לעובד במגזר הלא-סחיר m_N הוא פונקציה של המשתנים האקסוגניים (ושל השכר, שתלוי במשתנים האקסוגניים בלבד):

$$10. \quad \frac{dY_N}{dM} : \frac{dY_N}{dL} = \frac{P_M}{W} \Rightarrow m_N = \left(\frac{\mu W_T}{(1-\mu)P_M}\right)^\varepsilon$$

מתנאי סדר ראשון של הפירמה במגזר הלא-סחיר לפי K נובע:

$$11. \quad P_K = P_N \frac{dY_N}{dK_N} \Rightarrow k_N = \left[\frac{(1-\beta)P_N A_N}{P_K}\right]^{\frac{1}{\beta}} \left[(1 - \mu) + \mu m_N^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}}\right]^{\frac{\varepsilon}{\varepsilon-1}}$$

מתנאי סדר ראשון של הפירמה במגזר הלא-סחיר לפי L נובע:

$$12. \quad W = P_N \frac{dY_N}{dL_N} \Rightarrow W = (1 - \mu)P_N A_N \beta \left[(1 - \mu) + \mu m_N^{\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}}\right]^{\frac{\varepsilon\beta}{\varepsilon-1}-1} k_N^{(1-\beta)}$$

ממשוואות 9 עד 12 נקבל את מחיר המוצר הלא-סחיר של שיווי המשקל כפונקציה של המשתנים האקסוגניים:¹³

$$13. \quad P_N = U[(V^{1-\sigma} - \theta^\sigma)^{(1-\varepsilon)/(1-\sigma)}(1 - \theta)^{\sigma(1-\varepsilon)/(\sigma-1)}(1 - \mu)^\varepsilon + \mu^\varepsilon]^{\beta/(1-\varepsilon)}$$

¹² נעלה את משוואה 8 בחזקת $[(\alpha-1)/\alpha]$ ונחלק את משוואה 8 במשוואה 7 (כדי להיפטר מ- K ולחלק קשר בין M למשתנים האקסוגניים).

¹³ לאחר הצבת m_N (כפי שמופיע במשוואה 7) במשוואות 8 ו-9 נקבל שתי משוואות בשני נעלמים: k_N ו- P_N .

$$U \equiv [A_N(1 - \beta)^{(1-\beta)}\beta^\beta]^{-1} \left(\frac{P_K}{P_M}\right)^{-\beta} P_K$$

(הגדרת V הופיעה בסמוך למשוואה 7.)

אם גמישויות התחלופה בין הון תחליפי (M) לעבודה (L) זהות בשני המגזרים, $\varepsilon \equiv \sigma$:

$$i. \quad P_N [\varepsilon \equiv \sigma] = U \left\{ (V^{(1-\sigma)} - \theta^\sigma) [(1 - \mu)/(1 - \theta)]^\sigma + \mu^\sigma \right\}^{\beta/(1-\sigma)}$$

אם הפרמטרים θ ו- μ זהים:

$$ii. \quad P_N [\theta \equiv \mu] = U \left[(V^{(1-\sigma)} - \theta^\sigma)^{(1-\varepsilon)/(1-\sigma)} (1 - \theta)^{(\varepsilon-\sigma)/(1-\sigma)} + \theta^\varepsilon \right]^{\beta/(1-\varepsilon)}$$

שיווי משקל כללי מחייב שיווי משקל בשוק המוצרים, אך תנאי זה אינו מגביל, משום שעקומת התמורה של המשק ליניארית.¹⁴

לדוגמה, אם נניח שפונקציית התועלת של הפרט המייצג היא:

$$14. \quad U(C_T, C_N) = \left[a^{1/b} C_T^{(b-1)/b} + (1 - a)^{(1/b)} C_N^{(b-1)/b} \right]^{b/(b-1)}$$

נקבל שהפרט המייצג ממַרְב (maximize) את התועלת כאשר:

$$15. \quad \frac{C_T}{C_N} = \left(\frac{a}{1-a} \right) \left(\frac{P_N}{P_T} \right)^b$$

נציב את P_N (ממשוואה 13) ונקבל שצריכת המוצר הלא-סחיר (C_N) היא פונקציה של צריכת התוצר הסחיר (C_T) ושל המשתנים האקסוגניים. כאמור, סך הצריכה של המוצר הלא-סחיר זהה לסך התוצר הלא-סחיר.

א. השפעת השינוי במחיר ההון התחליפי (P_M):

גמישות ההון התחליפי לעובד (m_T) ביחס למחיר ההון התחליפי (P_M):

$$\text{Elasticity } m_T, P_M = \frac{dm_T}{dP_M} \frac{P_M}{m_T} = -\sigma \left(1 - \theta^\sigma V^{\sigma-1} \right)^{-1}$$

הגדרת V הופיעה בסמוך למשוואה 7.

הגמישות שלילית אם ורק אם

$$1 > \theta^\sigma V^{\sigma-1}$$

כזכור, זה התנאי לשכר חיובי (משוואה 9), ולכן הוא מתקיים בוודאות.

גמישות השכר ביחס למחיר ההון התחליפי:

¹⁴ במילים אחרות: ניתן לייצר את הכמות המבוקשת של המוצר הלא-סחיר על ידי התאמת מספר העובדים במגזר זה. התאמה זו לא תשפיע על התוצר לעובד בשני המגזרים ולא תשפיע על השכר. כזכור, ממשוואה 2 נובע שהנגזרת של תוצר המגזר הסחיר ביחס לגורם הייצור עבודה תלויה ביחסי ההון לעובד (k_T ו- m_T), וכפי שראינו במשוואות 4 ו-5 יחסי הון לעובד אלו (k_T ו- m_T) של שיווי משקל) תלויים במשתנים האקסוגניים בלבד (כלומר ב- P_K, P_M, P_T, A_T). הנגזרת של תוצר המגזר הסחיר ביחס לגורם הייצור עבודה L_T תלויה אך ורק במשתנים האקסוגניים – ואינה תלויה ב- L_T , והנגזרת השנייה של תוצר המגזר הסחיר ביחס ל- L_T שווה לאפס. באופן דומה נקבל שהנגזרת השנייה של תוצר המגזר הלא-סחיר ביחס לגורם הייצור עבודה L_N שווה לאפס. זאת אומרת שמעבר של תשומת עבודה בין המגזרים (בשיווי משקל) יגדיל את התפוקה בשיווי אחר, ללא תלות במקומו של המשק על עקומת התמורה.

$$\text{Elasticity } W, P_M = \frac{dW}{dP_M} \frac{P_M}{W} = -\{1 - \theta^\sigma V^{\sigma-1}\}^{-1} = 1 + \sigma^{-1} \text{Elasticity } m_T, P_M$$

הגמישות שלילית אם, ורק אם¹⁵

$$1 > \theta^\sigma V^{(\sigma-1)} > 0$$

מכאן שירידה במחיר של P_M , שתגדיל את m_T , תגדיל בהכרח גם את השכר במשק (השכר הריאלי במונחי המוצר הסחיר).¹⁶

כאשר גמישות התחלופה שואפת ל-1, גמישות השכר ביחס למחיר P_M היא:

$$\text{Elasticity } W, P_M(\sigma = 1) = \frac{dW}{dP_M} \frac{P_M}{W} = -\frac{\theta}{1-\theta}$$

כאשר גמישות התחלופה שואפת לאינסוף, גמישות השכר ביחס למחיר P_M שואפת לאפס. תוצאה זו נובעת מההנחה שגמישות התחלופה בין עבודה להון חדשני גדולה מאחד וגמישות התחלופה בין שני גורמי הייצור הללו להון המסורתי שווה לאחד.

גמישות מחיר המוצר הלא-סחיר (P_N) ביחס למחיר ההון התחליפי (P_M):

במקרה שגמישות התחלופה בין עבודה להון תחליפי זהה בשני המגזרים ($\varepsilon \equiv \sigma$) שיעור השינוי במחיר המוצר הלא-סחיר ביחס לשיעור השינוי במחירו של ההון התחליפי הוא:

$$\text{Elasticity } P_N, P_M = \frac{dP_{NT}}{dP_M} \frac{P_M}{P_{NT}} = \beta - \beta \left\{ 1 - V^{(\sigma-1)} [\theta^\sigma - \mu^\sigma (1-\theta)^\sigma (1-\mu)^{-\sigma}] \right\}^{-1}$$

ירידת מחיר ההון התחליפי תייקר את מחיר המוצר הלא-סחיר (משמע שהגמישות שלילית) אך ורק אם מתקיימים שני התנאים הבאים:

$$1. \theta > \mu$$

$$2. \theta^\sigma - \mu^\sigma (1-\theta)^\sigma (1-\mu)^{-\sigma} < V^{(1-\sigma)}$$

מאחר ש- $1 > \theta^\sigma V^{\sigma-1}$ התנאי השני מתקיים, ולכן עבור $\varepsilon \equiv \sigma$:

אם θ גדול מ- μ , ירידת מחיר ההון התחליפי תייקר את המוצר הלא-סחיר ($\varepsilon \equiv \sigma$).

אם θ קטן מ- μ , ירידת מחיר ההון התחליפי תוזיל את המוצר הלא-סחיר ($\varepsilon \equiv \sigma$).

התוצאה שהתקבלה היא זאת: ירידת מחיר ההון התחליפי גוררת התייקרות של מחיר המוצר הלא-סחיר במדינות שבהן העתירות היחסיות בהון חדשני (של המגזר הסחיר ביחס למגזר הלא-סחיר) גדולה בהשוואה למדינות האחרות. טענה זו מקבילה לטענה שגידול בפריון היחסי (של המגזר הסחיר ביחס למגזר הלא-סחיר) בהשוואה לזה של המדינות האחרות גוררת התייקרות של מחיר המוצר הלא-סחיר.

¹⁵ הביטוי חיובי, ולכן התנאי האחר מיותר. ירידה של מחיר ההון התחליפי עשויה להוריד את השכר (השכר הריאלי במונחי מחיר המוצר הסחיר) רק אם $1 < B$ (תנאי הכרחי אך לא מספיק), למשל כאשר מחיר ההון התחליפי זול בהשוואה למחיר ההון (P_K / P_M גדול), ו- θ גדולה מאחת (ותטא גדולה יחסית), אך אלו מקרים נדירים, ובטווח פרמטרים סביר ירידת מחיר ההון התחליפי מעלה את השכר.

¹⁶ תוצאה זו נובעת באופן ישיר מההנחות שפונקציות הייצור הן תק"ל והביקוש למוצר הסחיר גמיש לחלוטין. בהנחות אלו, ירידה אקסוגנית במחיר של כל אחד מגורמי הייצור (הון חדשני או הון מסורתי) תוביל לעלייה במחיר של גורם הייצור שמחירו אנדוגני (עבודה), כלומר השכר חייב לעלות.

ב. השפעת פרמטר החלוקה θ ופרמטר החלוקה μ על המחירים

כאמור, גידול בפרמטר החלוקה שקול לשיפור באיכות ההון החדשני המאפשר להון זה לבצע משימות חדשות שבוצעו בעבר על ידי עובדים (Acemoglu and Restrepo, 2022).

הדיון מוגבל למקרה שגמישויות התחלופה זהות בשני המגזרים: $\varepsilon = \sigma$, ומנקודת מוצא שבה $\theta = \mu$. מגזירת מחיר המוצר הלא-סחיר ביחס לפרמטרי החלוקה (משקל) θ ו- μ נובע:

1. לשינויים זהים ב- θ ו- μ לא תהיה כל השפעה על מחיר המוצר הלא-סחיר. הערך המוחלט של נגזרת מחיר המוצר הלא-סחיר לפי θ זהה לזה של נגזרת המחיר הלא-סחיר לפי μ , וסימני הנגזרות הפוכים.

$$\frac{dP_N}{d\theta} [\theta \equiv \mu] = -\frac{dP_N}{d\mu} [\theta \equiv \mu]$$

2. מנקודת המוצא שבה $\theta = \mu$, גידול של θ ביחס לפרמטר המקביל בפונקציית הייצור של המגזר הלא-סחיר (μ) יגרור ירידה של מחיר המוצר הלא-סחיר; ואילו גידול בפרמטר μ ביחס לפרמטר המקביל בפונקציית הייצור של המגזר הסחיר (θ) יגרור עלייה של מחיר המוצר הלא-סחיר.

ג. חלק השכר בתוצר של המגזר הסחיר

חלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר כפונקציה של המשתנים האקסוגניים:

$$\frac{W_T L_T}{P_T Y_T} = [\alpha / \theta V] [(V\theta)^{1-\sigma} - \theta]^{1/(1-\sigma)} \{1 + \theta [(V\theta)^{1-\sigma} - \theta]^{-1}\}^{\sigma/(1-\sigma)}$$

$$V \equiv \alpha [(1-\alpha)^{(1-\alpha)}]^{1/\alpha} \left(\frac{P_K}{P_M} \right) \left(\frac{A_T P_T}{P_K} \right)^{1/\alpha}$$

הגזירה של המשוואה לעיל ביחס למחירים האקסוגניים מסורבלת. ואולם, מאחר שהמודל מניח שחלק ההון המסורתי בתוצר המגזר הסחיר קבוע ושווה ל- $(1-\alpha)$, ניתן לחשב את חלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר כפונקציה של המשתנים האקסוגניים ושל יחס ההון M_T/K_T . יחס זה אנדוגני ותלוי במשתנים האקסוגניים:

$$16. \frac{P_M M_T}{P_T Y_T} = (1-\alpha) \frac{P_M M_T}{P_K K_T} \Rightarrow \frac{W L_T}{P_T Y_T} = \alpha - (1-\alpha) \frac{P_M M_T}{P_K K_T}$$

באותו אופן ניתן לחשב את חלק העבודה בתוצר של המגזר הלא-סחיר.

$$17. \frac{P_M M_N}{P_N Y_N} = (1-\beta) \frac{P_M M_N}{P_K K_N} \Rightarrow \frac{W L_N}{P_N Y_N} = \beta - (1-\beta) \frac{P_M M_N}{P_K K_N}$$

חלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר (הלא-סחיר) נמוך יותר ככל שהיחס $P_M M_T / P_K K_T$ גדול יותר. כאמור, יחסים אלו נמדדו בנתוני KLEMS ל-14 מדינות, וייעשה בהם שימוש בסעיף הבא, שייציג ניתוח כמותי של המודל.

לסיכום חלק זה: במשק קטן ופתוח, כאשר מחיר ההון התחליפי יורד (יתר הדברים קבועים) השימוש בהון התחליפי במגזר הסחיר גדל; בעקבות זאת גדל גם השימוש של מגזר זה בהון הרגיל (המשלים); כתוצאה מכך גדלה בו התפוקה השולית של העבודה, ועולה השכר במגזר הסחיר ובמשק

כולו (השכר הריאלי במונחי מחיר המוצר הסחיר). הוזלת מחיר ההון התחליפי תפעל להוזלת מחיר המוצר הלא-סחיר, בעוד שעליית השכר (שהיא, כאמור, תוצאה של הוזלת מחיר ההון התחליפי) תפעל לעליית מחירו. מחירו של המוצר הלא-סחיר יעלה אם ייצורו דל בהון תחליפי בהשוואה למוצר הסחיר (ועתיר יותר בעבודה); אם עתירות השימוש בהון תחליפי זהה בשני המגזרים, מחיר המוצר הלא-סחיר יישאר ללא שינוי.¹⁷

5. ניתוח כמותי

חלק זה מציג ניתוח כמותי של המודל. לשם כך, אנו מכילים את המודל לשנת בסיס וכופים עליו שני שינויים אקסוגניים שהתרחשו במהלך התקופה הנחקרת (1995–2015): ירידה של 50% במחיר ההון החדשני ועלייה של 30 אחוז בפריז המגזר הסחיר; יתר משתני המודל נותרים קבועים. השפעתם של שינויים אלה על המודל מוצגת בלוח 3, וכפי שנראה, התוצאות תלויות בגמישות התחלופה שנבחרה. בהמשך נעשה שימוש במידע על התפתחות יחס ההון החדשני ($P_m M / P_K K$) בכל מגזר (כפי שנמדדו בנתוני KLEMS ל-14 מדינות). התפתחותו של יחס זה קובעת את התפתחות חלק העבודה בתוצר ומשפיעה גם על התפתחות המחירים. התוצאות של תרגיל זה תוצגנה בלוח 4.

כיוול המודל לשנת הבסיס (שנת 2015): תחילה נבחר ערך מספרי לגמישות תחלופה בין הון חדשני לעבודה – למשל 1.25 או 1.5 – ואז נכיל את המודל עבור כל אחת מהחלופות. את מחירי המוצר הסחיר ננרמל ל-100, ונניח שמחיר ההון המסורתי ומחיר ההון החדשני שווים למחיר המוצר הסחיר. הפריז הכולל של המגזר הלא-סחיר נורמל ל-1; ואילו הפריז הכולל של המגזר הסחיר נקבע ל-1.3, בהתאם לנתוני "המדינה הממוצעת" (ממוצע 14 המדינות), המורים על גידול של 30% בפריז היחסי בין 1995 עד 2015. לפיכך, המודל כויל כך: $A_{T,2015}=1.3$, $A_{N,2015}=1$, $A_{T,1995}=1$, $A_{N,1995}=1$. פרמטרי החזקה עבור ההון המסורתי בכל אחד משני המגזרים נקבעו בהתאם לחלק ההון בתוצר ב"מדינה הממוצעת" בשנת 1995: 40% במגזר הסחיר ($\alpha = 0.6$) ו-27% במגזר הלא-סחיר ($\beta = 0.73$). לבסוף נקבעו שני פרמטרי החלוקה כך שפתרון המודל יניב לכל מגזר יחס הון חדשני הזהה לממוצע 14 המדינות בשנת 2015: פרמטר החלוקה θ קבע את יחס ההון החדשני במגזר הסחיר; ופרמטר החלוקה μ קבע את יחס ההון החדשני במגזר הלא-סחיר. בשלב זה, הנחנו שכל הפרמטרים של פונקציית הייצור קבועים על פני זמן – פרמטרי שנת 1995 זהים לפרמטרי שנת 2015. כאמור, כפינו על המודל המכיל שני שינויים אקסוגניים שהתרחשו בין 1995 ל-2015: ירידה של 50% במחיר ההון החדשני ועלייה של 30 אחוז בפריז של המגזר הסחיר, בעוד שיתר הדברים (המחירים והפרמטרים) נותרים קבועים. השלכות השינויים האקסוגניים על המודל המכיל מוצגות בלוח 3.

לוח 3: השפעת ירידה של 50% במחיר ההון החדשני בשנים 1995–2015 על התפתחות משקל ההון החדשני ומשקל העבודה בתוצר, בהנחה שכל הפרמטרים של פונקציית הייצור נותרו קבועים לאורך זמן.

הנחה – גמישות תחלופה, בשני המגזרים ובשתי התקופות:	1.001	1.25	1.5	2
---	-------	------	-----	---

¹⁷ אילו היה הייצור של המוצר הלא-סחיר עתיר בהון תחליפי (ביחס למוצר הסחיר) הייתה הוזלת מחיר ההון התחליפי פועלת להוזלת מחירו.

6.2	3.5	2.7	2.0	יחס ההון החדשני של המגזר הסחיר – m_T/k_T – הוכפל פי
6.5	3.6	2.7	2.0	יחס ההון החדשני של המגזר הלא-סחיר – m_N/k_N – הוכפל פי
-3.8	-2.4	-1.4	0.0	השינוי בחלק העבודה בתוצר במגזר הסחיר, בנקודות אחוז
-0.9	-0.6	-0.4	0.0	השינוי בחלק העבודה בתוצר במגזר הלא-סחיר, בנקודות אחוז
0.429	0.257	0.171	0.093	הנחה – פרמטר החלוקה של המגזר הסחיר
0.244	0.101	0.051	0.019	הנחה – פרמטר החלוקה של המגזר הלא-סחיר
43.1	44.8	45.8	47.1	התייקרות מחיר המוצר הלא-סחיר, באחוזים

הנחות: בשנת 1995: $P_T=P_K=100$, $P_M=200$, ו- $A_N=A_T=1$; בשנת 2015: $P_K=P_T=100$, $P_M=100$, $A_N=1$, ו- $A_T=1.3$.
(חל גידול של 30% בפירון הכולל של המגזר הסחיר). בשתי התקופות: $\alpha=0.6$ ו- $\beta=0.73$. יחסי ההון למגזר הסחיר והלא-סחיר $(m_N/k_N$ ו- $m_T/k_T)$ הותאמו לערכם בפועל בשנת 2015 על ידי קביעת θ ו- μ , בהתאמה; פרמטרים אלו קבועים (זהים בשנת 1995 ובשנת 2015).

תוצאות: ככל שגמישות התחלופה גדולה יותר, הגידול ביחס ההון החדשני חד יותר, והירידה בחלק העבודה בתוצר גדולה יותר (בעוד שההתייקרות במחירי המגזר הלא-סחיר מתונה יותר): כאשר גמישות התחלופה יחידתית, השינוי האקסוגני במחירים (ובפירון) הכפיל את יחס ההון החדשני פי שניים, וחלק העבודה בתוצר נותר ללא שינוי. כאשר גמישות התחלופה שווה ל-2, השינוי האקסוגני במחירים הגדיל את היחס m_T/k_T פי 6.2, והפחית את חלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר ב-3.8 נקודות אחוז (ראו לוח 3).

האומדן להשפעת הירידה של מחיר ההון החדשני על חלק העבודה בתוצר של המגזר הלא-סחיר נמוך בהשוואה לזה של המגזר הסחיר. זאת בעיקר משום שהשימוש בהון החדשני במגזר הלא-סחיר קטן יותר. האומדנים שהתקבלו (למגזר הלא-סחיר) רגישים לבחירת הפרמטר β , והעובדה שקבענו $\beta=0.73$ ולא $\beta=0.6$ פעלה להקטנתם. אם נקבע $\alpha=\beta=0.6$, נקבל שהאומדן של תרומת ירידה של 50% במחיר ההון החדשני להקטנת חלק העבודה בתוצר של המגזר הלא-סחיר גדלה (מ-0.9 נקודות אחוז) ל-1.4 נקודות אחוז (זאת עבור גמישות תחלופה של 2); אך אומדן זה עדיין נמוך במידה ניכרת בהשוואה לזה של המגזר הסחיר העצים בהון חדשני.¹⁸

כעת ניעזר בעובדה שיחס ההון החדשני (הנומינלי) במגזר הסחיר גדל מ-6.3% בשנת 1995 ל-13.9% בשנת 2015; וזה של המגזר הלא-סחיר גדל באותה תקופה מ-2.5% ל-5%. נכפה ערכים אלו על המודל המכיל באמצעות בחירת פרמטרי חלוקה שונים לכל תקופה ולכל מגזר. התוצאה: בכל המקרים נקבל שינוי זהה בחלק העבודה בתוצר, ללא תלות בגמישות התחלופה. תוצאות אלו מוצגות בשורות 2–5 בלוח 4, והן נובעות באופן ישיר ממשוואה 16, שלפיה חלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר שווה ל: $\alpha - (1 - \alpha) \frac{P_M M_T}{P_K K_T}$. ממשוואה 16 נובע שאם הפרמטר α שווה 0.6, אזי גידול של 7.6 נקודות אחוז ביחס ההון החדשני של המגזר הסחיר (מ-6.3% בשנת 1995 ל-13.9% בשנת 2015) גורר ירידה של 3 נקודות אחוז בחלק העבודה בתוצר, ללא תלות בגמישות התחלופה

¹⁸ תובנה נוספת מסימולציות נוספות (שאינן מוצגות כאן) היא שלשינוי של גמישות התחלופה של מגזר אחד אין השפעה של ממש על הגידול ביחס ההון החדשני של המגזר האחר או על השינוי בחלק העבודה בתוצר של המגזר האחר.

($0.4 \times 7.6 = 3$). באותו אופן, ממשוואה 16 נובע שגידול של 2.5 נקודות אחוז ביחס ההון של המגזר הלא-סחיר גורר ירידה של 0.7 נקודות אחוז בחלק העבודה של המגזר הלא סחיר ($0.27 \times 2.5 = 0.7$).¹⁹

ככל שנבחר גמישות תחלופה גדולה יותר, נדרש גידול מתון יותר בפרמטר החלוקה: כשגמישות התחלופה היא 1, כל הגידול ביחס ההון החדשני נובע מהעלייה בפרמטר החלוקה בין 1995 ל-2015, כך שלירידה התלולה במחיר ההון החדשני אין כל תרומה לגידול ביחס ההון החדשני. מנגד, כאשר גמישות התחלופה היא 1.6, די בירידה של 50% במחיר ההון החדשני (ובשינוי הפריזון, כאמור) כדי להסביר את כל הגידול ביחס ההון החדשני במגזר הלא-סחיר; כך שלא נותר מקום להעלאת פרמטר החלוקה. מכאן ניתן להסיק כי ערך של 1.6 מהווה חסם עליון לגמישות התחלופה במגזר הלא-סחיר (שכן פרמטרי החלוקה בוודאי לא פחתו). שנית, ככל שגמישות התחלופה גדולה יותר והגידול בפרמטר החלוקה מתון יותר, כך ההתייקרות של מחירי המוצרים הלא-סחירים מתונה יותר (ראו השורה התחתונה בלוח 4).

כאמור, קרוב לוודאי שמדידת השינוי במחיר ההון החדשני מוטה בשל השיפור הניכר באיכותו. ואולם, בהנחה שחלקו במלאי ההון הנומינלי היה כפי שנמדד בנתונים בשנת 1995; אזי גם אם נניח שמחיר ההון החדשני ירד ב-60% (ולא ב-50% כפי שמופיע בנתונים) נקבל שהאומדנים לירידה בחלק העבודה בתוצר נותרו כשהיו, וכפי שמופיע בלוח 4. זאת משום שהמשמעות של ירידת מחיר חדה יותר היא גידול גדול עוד יותר ביחס ההון החדשני הריאלי.

לוח 4: השפעת הגידול ביחס ההון החדשני על התפתחות משקל העבודה בתוצר (בכל אחד משני המגזרים) במהלך השנים 1995 עד 2015, (זאת בהנחה שפרמטרי החלוקה של פונקציית הייצור עלו במהלך השנים)

1.6	1.5	1.25	1.001	הנחה – גמישות תחלופה, בשני המגזרים ובשתי התקופות:
4.4	4.4	4.4	4.4	יחס ההון החדשני של המגזר סחיר – m_T/k_T – הוכפל פי
4.0	4.0	4.0	4.0	יחס ההון החדשני של המגזר הלא-סחיר – m_N/k_N – הוכפל פי
-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	השינוי בחלק העבודה בתוצר במגזר הסחיר, בנקודות אחוז
-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	השינוי בחלק העבודה בתוצר במגזר הלא-סחיר, בנקודות אחוז
0.125	0.092	0.036	0.009	הנחה – פרמטר החלוקה של המגזר הלא-סחיר 1995
0.126	0.101	0.051	0.019	הנחה – פרמטר החלוקה של המגזר הלא-סחיר 2015
0.273	0.222	0.114	0.042	הנחה – פרמטר החלוקה של המגזר הסחיר 1995
0.292	0.257	0.171	0.093	הנחה – פרמטר החלוקה של המגזר הסחיר 2015
38.1	35.5	30.2	27.2	התייקרות מחירי הלא-סחירים, באחוזים

הנחות: בשנת 1995: $P_M=200, P_T=P_K=100$, ו- $A_N=A_T=1$. בשנת 2015: $P_M=100, P_K=P_T=100$, ו- $A_T=1.3, A_N=1$. (חל גידול של 30% בפריזון הכולל של המגזר הסחיר). בשתי התקופות: $\alpha=0.6$ ו- $\beta=0.73$. יחסי ההון למגזר הסחיר והלא-סחיר (m_T/k_T ו- m_N/k_N) הותאמו לערכם בפועל של שנת 2015 על ידי קביעת θ ו- μ , בהתאמה. קביעת θ לשנת 1995 קיבעה את יחס ההון החדשני של המגזר הסחיר כך שיהיה שווה ל-0.227. מזה שהיה בשנת 2015. קביעת μ לשנת 1995 קיבעה את יחס ההון החדשני של המגזר הלא-סחיר כך שיהיה שווה ל-0.25. מזה שהיה בשנת 2015.

¹⁹ בסימולציה שבה $\beta=0.6$ (ולא ל-0.73) נמצא שחלק העבודה בתוצר של המגזר הלא-סחיר יורד בנקודות אחוז (ולא ב-0.7).

6. סיכום

ההון החדשני שונה מההון המסורתי בכך שהיכולת שלו להחליף עובדים אנושיים (השפעת התחלופה) משתפרת בקצב מהיר יותר בהשוואה ליכולת שלו לסייע ולהשלים לאותם עובדים (השפעת ההשלמה). מחקרים אמפיריים מהשנים האחרונות מצביעים על כך שהשימוש בהון חדשני פעל להחלפת עובדים שעסקו במשימות ייצור רוטיניות. מודלים תאורטיים ייחסו להון החדשני השפעת תחלופה בלבד, ומצאו שהשימוש בו מקטין את חלק העבודה בתוצר.

המודל כאן עוסק במשק קטן ופתוח והוא מתבסס על המודל הקלאסי של Balassa-Samuelson, שהטיב להסביר את רמות המחירים שנקבעו במשקים השונים כפונקציה של רמת פריון הייצור (TFP) בהם. המודל מניח משק שבו מייצרים שני סוגי מוצרים – סחירים ולא-סחירים – בעזרת שלושה גורמי ייצור: עבודה, הון רגיל והון חדשני-תחליפי לעבודה. גמישות התחלופה בין ההון המסורתי לעבודה היא יחידתית (כמו במודל הקלאסי), ואילו גמישות התחלופה שבין ההון החדשני לעבודה גדולה מיחידתית. פתרון המודל מלמד שירידת מחיר ההון החדשני פועלת לעליית השכר הריאלי. כאשר מחיר ההון התחליפי יורד (יתר הדברים קבועים), השימוש בהון התחליפי במגזר הסחיר גדל; בעקבות זאת גדל השימוש של מגזר זה בהון הרגיל (המשלים); כתוצאה מכך גדלה התפוקה השולית של העבודה, ועולה השכר במגזר הסחיר ובמשק כולו (השכר הריאלי במונחי מחיר המוצר הסחיר).

במשק שבו המגזר הסחיר הוא המגזר העתיר בהון חדשני המחליף עבודה, ירידת מחירו של הון זה פועלת להתייקרות המוצר הלא-סחיר. הוזלת מחיר ההון התחליפי תפעל להוזלת מחיר המוצר הלא-סחיר, בעוד שעליית השכר (שהיא, כאמור, תוצאה של הוזלת מחיר ההון התחליפי) תפעל לעליית מחירו – והיא הדומיננטית. במשק שבו המגזר הלא-סחיר הוא המגזר העתיר בהון חדשני, ירידת מחיר ההון החדשני תפעל להוזלת מחירי הלא-סחירים. אם עתירות השימוש בהון תחליפי זהה בשני המגזרים, מחירו (היחסי) של המוצר הלא-סחיר יישאר ללא שינוי.

במידה שפונקציית הייצור של מגזר אחד הופכת עתירה יותר בשימוש בהון חדשני בשל גידול בפרמטר החלוקה בפונקציית הייצור של אותו מגזר (בהשוואה לפרמטר המקביל בפונקציית הייצור של המגזר האחר), יחול שינוי במחירי הלא-סחירים במשק. גידול בפרמטר החלוקה של המגזר הסחיר בהשוואה לזה של המגזר הלא-סחיר יגרור ירידה של מחיר המוצר הלא-סחיר (ובהקבלה, גידול בפרמטר החלוקה של המגזר הלא-סחיר בהשוואה לזה של המגזר הסחיר יגרור עלייה של מחיר המוצר הלא-סחיר).

קליברציה של המודל לנתונים בפועל (ממוצע 14 מדינות מפותחות בשנת 1995 ובשנת 2015) מלמדת שהגידול בחלקו של ההון החדשני במלאי ההון יכול להסביר ירידה של כ-3 נקודות אחוז בחלק העבודה בתוצר של המגזר הסחיר, וירידה של כ-0.7 נקודות אחוז בחלק העבודה בתוצר של המגזר הלא-סחיר. במילים אחרות, המודל מצליח להסביר כמעט את מלוא הירידה בחלק העבודה בתוצר בסקטור הסחיר, אך רק כרבע מהירידה בסקטור הלא-סחיר. אומדן זה רגיש להנחות, אך הוא איננו רגיש להנחה שנבחרה לגמישות התחלופה, ואיננו רגיש למקור הגידול בהון החדשני: בין אם המקור לשינוי הוא ירידת מחיר ההון החדשני ובין אם מקורו בעלייה בפרמטר החלוקה בפונקציית הייצור של כל אחד משני המגזרים. מאחר שמחיר ההון החדשני ירד בשיעור תלול של 50%, גמישות תחלופה הגבוהה אך במעט מ-1.6 יכולה להסביר את כל הגידול בחלקו של ההון החדשני במלאי

ההון של המגזר הלא-סחיר (ואת רובו המכריע של הגידול בזה של המגזר הסחיר), ללא כל שינוי בפרמטרי החלוקה של פונקציית הייצור. לחילופין, ייתכן שגמישות התחלופה נמוכה יותר מ-1.6 (אך עדיין גדולה מיחידתית) ושני פרמטרי החלוקה של פונקציית הייצור גדלו. במקרה כזה התייקרות מחירי הלא-סחירים תהיה מתונה יותר.

מקורות

- Acemoglu D. and Restrepo P. (2018), "Artificial Intelligence, Automation and Work", A. Agrawal, J. Gans and A. Goldfarb (eds.), *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*, Chicago, 197–236.
- Acemoglu D. and Restrepo P. (2020), "Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets", *Journal of Political Economy* 128(6), 2188–2244.
- Acemoglu D. and Restrepo P. (2022), "Tasks, Automation and the Rise in US Wage Inequality", *Econometrica* 90(5), 1973–2016.
- Balassa B. (1964), "The Purchasing-Power Parity Doctrine: A Reappraisal", *Journal of Political Economy* 72(6), 584–596.
- DeCanio S. J. (2016), "Robots and Humans – Complements or Substitutes?", *Journal of Macroeconomics* 49, 280–291.
- Decker M., Fischer M. and Ott I. (2017), "Service Robotics and Human Labor: A First Technology Assessment of Substitution and Cooperation", *Robotics and Autonomous Systems* 87, 348–354.
- Dinlersoz E. and Wolf Z. (2018), *Automation, Labor Share and Productivity: Plant-Level Evidence from US Manufacturing*, Working Papers 18–39, Center for Economic Studies, U.S. Census Bureau.
- Eden M. and Gaggl P. (2018), "On the Welfare Implications of Automation", *Review of Economic Dynamics* 29, 15–43.
- Graetz G. and Michaels G. (2018), "Robots at Work", *Review of Economics and Statistics* 100(5), 753–768.
- Gregory T., Salomons A. and Zierahn U. (2022), "Racing With or Against the Machine? Evidence on the Role of Trade in Europe", *Journal of the European Economic Association* 20(2), 869–906.
- Gubler M. and Sax C. (2019), "The Balassa-Samuelson Effect Reversed: New Evidence from OECD Countries", *Swiss Journal of Economics and Statistics* 155(1), 1–21.
- Jones C. I. (2016), "The Facts of Economic Growth", J. B. Taylor and H. Uhlig (eds.), *Handbook of Macroeconomics*, Amsterdam, Vol. 2, 3–69.

- Obstfeld M. and Rogoff K. (1996), *Foundations of International Macroeconomics*, Cambridge, MA.
- O'Mahony M. and Timmer M. P. (2009), "Output, Input and Productivity Measures at the Industry Level: The EU KLEMS Database", *The Economic Journal* 119(538), F374–F403.
- Report on Methodologies and Data Construction for the EU KLEMS Release (2019), The Vienna Institute for International Economic Studies.
- Samuelson P. A. (1964), "Theoretical Notes on Trade Problems", *The Review of Economics and Statistics* 46(2), 145–154.
- Zeira J. (1998), "Workers, Machines and Economic Growth", *The Quarterly Journal of Economics* 113(4), 1091–1117.