

הדינמיקה של מגפת COVID 19 בישראל והשלכותיה הכלכליות

טניה ברון, ערן ישיב ועופר קורנפלד

נייר דיון מס' 14-2020

המכון למחקר כלכלי ע"ש ישעיהו פורדר

מכון סאקלר לקידום מחקרים בכלכלה

הדינמיקה של מגפת COVID 19 בישראל והשלכותיה הכלכליות

מאת: טניה ברון¹, ערן ישיב² ועופר קורנפלד³

14 באוקטובר 2020

תקציר

החל מסוף פברואר 2020 חווה ישראל את מגפת COVID 19. במאמר זה אנו אומדים את הדינמיקה של המגפה ומנתחים את השלכותיה הבריאותיות והכלכליות למשק הישראלי. כבסיס לניתוח אנו משתמשים במודל אפידמיולוגי עדכני, המבוסס על תכונות הוירוס, ובנתוני ישראל. במסגרת מודל זה אנו בוחנים בסימולציה צעדי מדיניות חלופיים ומשווים אותם למה שנעשה בפועל. ההשוואה נעשית בפריזמה של אופטימיזציה של צעדי המדיניות. זאת על ידי הצגת בעיית תכנון של מתכנן חברתי מרכזי המנסה להביא למינימום פונקציית הפסד, הלוקחת בחשבון הן את התוצאות הבריאותיות (חולים, מתים, מגבלות מערכת הבריאות) והן את התוצאות הכלכליות (אובדן תוצר ותעסוקה).

ניתוח המודל מביא למסקנה כי בפני קובעי המדיניות עומדות בעיקרון שתי אסטרטגיות של מדיניות בריאות הציבור לטיפול במגפה. האסטרטגיה האחת מכוונת להשגת חיסון-עדר. זו נשענת על תפיסה לפיה העלות הכלכלית של אמצעי הסגר השונים (עד שיימצא חיסון) הינה יקרה מדי, ועל כן מתיר המתכנן המרכזי למגפה להתפשט, תוך שהוא מתזמן את אמצעי הסגר כך שהתמותה תהיה מינימלית, בהינתן שאין ביכולתו להמתין לחיסון. האסטרטגיה השנייה הינה המתנה לחיסון. כלומר, המתכנן מעריך את חיי האדם במידה כזו שהוא מוכן לשלם מחירים גבוהים יותר כדי לצמצם את התחלואה.

מכיוול המודל לישראל נראה שהמתנה לחיסון מהווה אסטרטגיה אופטימלית אך ורק כאשר ערך החיים מבחינת המתכנן הוא גבוה מספיק וכולל שיקולים רחבים יותר משיקולים כלכליים בלבד. הדינמיקה בפועל של המגפה בישראל מהווה מקרה ביניים של מסלולי שתי האסטרטגיות לעיל. המדיניות המוצהרת היא של המתנה לחיסון, תוך ניסיון לשלוט בהיקף המגפה על ידי פעולות ריסון הנושאות מחיר כלכלי. אך היעדר מדיניות יציאה סדורה מהסגר בגל הראשון הביאה לגל שני עם היקפי תחלואה ותמותה הגבוהים מאלו של הגל הראשון ומאלו המשתמעים מהאסטרטגיה השנייה שנדונה לעיל. בעת סגירת מאמר זה הוטל גם סגר שני.

¹ המחלקה לכלכלה, אוניברסיטת בן גוריון.

² ביה"ס לכלכלה, אוניברסיטת תל-אביב.

³ תנועת ישראל חופשית (ע"ר).

1. מבוא

החל מסוף פברואר 2020 חווה ישראל את מגפת COVID 19, מגפה שהתפשטה לכלל פנדמיה בעולם כולו. במאמר זה אנו אומדים את הדינמיקה של המגפה ומנתחים את השלכותיה הבריאותיות והכלכליות למשק הישראלי.

כבסיס לניתוח אנו משתמשים במודל אפידמיולוגי עדכני המבוסס על תכונות הוירוס ובנתוני ישראל. במסגרת מודל זה נאמוד את מקדם ההדבקה, שהוא פרמטר מרכזי במודל, על סמך נתוני הדינמיקה של המגפה במונחי נשאים ומתים. לאחר מכן, נבחן בסימולציה, תוך שימוש באותו המודל, צעדי מדיניות חלופיים ונשווה אותם למה שנעשה בפועל. ההשוואה נעשית בפריזמה של אופטימיזציה של צעדי המדיניות. זאת על ידי הצגת בעיית תכנון של מתכנן חברתי מרכזי המנסה להביא למינימום פונקציית הפסד. זו לוקחת בחשבון הן את התוצאות הבריאותיות (חולים, מתים, מגבלות מערכת הבריאות) והן את התוצאות הכלכליות (אובדן תוצר ותעסוקה).

הניתוח האמפירי מלמד על כך שבשנת 2020 אירעו בישראל שני גלים: הראשון בחודשים מרץ-אפריל, אליו הגיבה הממשלה מהר מאוד בצעדי מדיניות חריפים של סגר. במהלך חודש מאי ניתנו הקלות בתדירות ובהיקף הולכים וגדלים ולקראת סוף החודש, החל גל שני. בתחילת חודש ספטמבר, עם תחילת שנת הלימודים והתרופפות המשמעת החברתית התגבר קצב העלייה של המגפה. בשעת סגירת מאמר זה נראה כי מקדם ההדבקה עלה באופן משמעותי והממשלה הכריזה על סגר שני החל מ-18 בספטמבר.

ניתוח המודל של ניהול אופטימלי של המגפה מביא למסקנות הבאות: בפני קובעי המדיניות עומדות בעיקרון שתי אסטרטגיות של מדיניות בריאות הציבור לטיפול במגפה. האסטרטגיה האחת מכוונת להשגת חיסון-עדר. זו נשענת על תפיסה לפיה העלות הכלכלית של אמצעי הסגר השונים (עד שיימצא חיסון) הינה יקרה מדי, ועל כן מתיר המתכנן המרכזי למגפה להתפשט, תוך שהוא מתזמן את אמצעי הסגר כך שהתמותה תהיה מינימלית, בהינתן שאין ביכולתו להמתין לחיסון. האסטרטגיה השנייה הינה המתנה לחיסון. כלומר, המתכנן מעריך את חיי האדם במידה כזו שהוא מוכן לשלם מחירים גבוהים יותר כדי לצמצם את התחלואה.

⁴ אנו מודים לרון מילוא וינון בר און על שיחות מועילות ולרועי כנען על עזרה במחקר. ערן ישיב מודה למרכז לבנקאות חברתית בבנק הפועלים על תמיכה במחקר. כל הטעויות הן באחריותנו.

במודל המכויל לישראל, אנו מוצאים שערך החיים הסטטיסטי, במידה שהוא מתבסס על שיקולים כלכליים נפוצים, הוא נמוך מדי כדי להצדיק דיכוי ממושך של המחלה והמתנה לחיסון. בהינתן ערך חיים נמוך זה, יבחר המתכנן באסטרטגיה הראשונה. הוא נאלץ לתת למחלה להתפרץ ובוחר בהתערבויות קצרות יחסית, המיועדות לפזר את העומס על מערכת הבריאות על פני זמן עד להגעה לחסינות עדר. תוצאה זו מתקבלת עבור כלים שונים של התערבות מחזורית שאנו בוחנים, והיא נובעת מהשילוב של ערך חיים נמוך יחסית ועלות גבוהה של סגרים. מנגד, כאשר ערך החיים עבור המתכנן טומן בחובו שיקולים יותר רחבים משיקולים כלכליים בלבד, הוא מעדיף את האסטרטגיה השנייה: לדכא את המגפה על ידי סגרים ארוכים יותר ולהמתין לחיסון.

השוואה בין הסימולציה לנתונים בפועל מראה שהדינמיקה של התחלואה בפועל בישראל מהווה מקרה ביניים ביחס לשתי האסטרטגיות לעיל. המדיניות המוצהרת הינה של המתנה לחיסון, תוך ניסיון לשלוט בהיקף המגפה על ידי צמצום הפעילות, צעד הנושא עמו מחיר כלכלי. עם זאת, אסטרטגיה של המתנה לחיסון מחייבת בניית מדיניות של יציאה מהסגר, הבוחנת כל הזמן את היקף המגפה ומתאימה אליה את הפעילות הכלכלית (כמו למשל אסטרטגיית היציאה המחזורית שנציג בסעיף 6 להלן). היעדר מדיניות סדורה של יציאה מהסגר, והחזרה לשגרה מלאה של הפעילות במשק, הובילה לגל שני, שמחיריו הבריאותיים גבוהים מאלה של הגל הראשון, ומאלה המשתמעים מהאסטרטגיה השנייה דלעיל.

מבנה המאמר הוא כדלקמן:

בסעיף 2 נציג עובדות רקע על המגפה בישראל, כולל תיאור צעדי מדיניות בריאות הציבור והמדיניות הכלכלית שנקטו לאורך זמן. בסעיף 3 נציג מודל אפידמיולוגי של המגפה. על סמך המודל נציג בסעיף 4 את האמידה של מקדם ההדבקה בישראל, ובסעיף 5 ננתח בסימולציה את מדיניות בריאות הציבור בישראל. בסעיף 6 נוסיף את השלכותיה הכלכליות של המגפה לניתוח, ננסח בעיה של מתכנן מרכזי, ונכייל אותה לישראל. בסעיף 7 נדון במדיניות האופטימלית המתקבלת במודל המורחב ונערוך סימולציה על סמך מסקנותיו. הסימולציה בוחנת את אשר ארע בפועל אל מול מהלכי מדיניות חלופיים. סעיף 8 מסכם.

2. עובדות הרקע

תרשים 1 מביא את נתוני משרד הבריאות על מספר הנשאים (חולים מאומתים) ומספר החולים הקשים, שניהם במונחי זרם (תוספת ליום), ומספר המתים, במונחי מלאי. כל הנתונים הם במספרי אנשים.

תרשים 1

מהתרשימים ניתן לראות שהתקיים גל ראשון של המגפה מסוף פברואר, שהחל לרדת מסוף מרץ, וגל שני שהחל בתחילת יוני.

לוח 1 מפרט את אמצעי מדיניות בריאות הציבור שנקטו. הוא מציג את התאריכים של ההחלטות העיקריות לגבי הטלת מגבלות והסרתן בחודשים פברואר עד אוגוסט 2020.

לוח 1

בתרשים 2 מוצגת הדינמיקה של מספר הנשאים החדשים ביחד עם לוח הזמנים של צעדי המדיניות.

תרשים 2

צעדי המדיניות הראשונים, בין תחילת פברואר ועד 9 במרץ, התבססו על היותה של ישראל מדינה קלה יחסית לבידוד בינלאומי ובעלת שערי כניסה מועטים ומבוקרים. הם כללו בעיקר בידוד מרצון של החוזרים מחו"ל ממדינות בהן חלה התפרצות ואיתור ובידוד של נשאים מאומתים. אך בחג פורים אבדה השליטה במגפה וחולים שלא אותרו עד אותה עת הרחיבו את התפשטות המגפה בצורה משמעותית. תוך שבועיים הוטל סגר כללי, שכלל השבתת מסחר רחבה והגבלת יציאה מהבית, וסביב חג הפסח בתחילת אפריל הוטלו הגבלות תנועה מלאות. מהלכים אלו גרמו לדעיכה מהירה של המגפה. בתחילת מאי בוטל הסגר הכללי והחלו צעדי שחרור הדרגתיים אך מהירים. בסוף מאי, ערב חג השבועות, הוכרז על "ניצחון על המגפה" ואכן מספר החולים החדשים שהתגלו היה נמוך מאוד. בתקופה זו נבנתה בישראל מערכת לביצוע בדיקות רבות, עד נפח של 60 אלף בדיקות ביום, אך לא נבנה מערך אפידמיולוגי לאיתור ובידוד חולים היכול לעמוד בהיקפי תחלואה גבוהים. הגל השני החל להתפרץ בתחילת יוני, עם החזרה של בתי הספר לפעילות מלאה, אך צעדי המדיניות המוגבלים במהלך יולי ואוגוסט וחופשת הקיץ, שמרו על היקף מגפה גבוה מאוד אך קבוע פחות או יותר עד לסוף אוגוסט. מצב עניינים זה אינו יציב ואינו מאפשר הרחבת המגעיים החברתיים. אף על פי כן, בתחילת ספטמבר נפתחה שנת הלימודים ואיתה התרופפה המשמעות החברתית, קצב התפשטות המגפה עלה ובעת סגירת מאמר זה נאלצה הממשלה לנקוט מדיניות של סגר מחמיר לקראת חגי תשרי.

מדינות שונות בעולם נקטו צעדים על מנת להתמודד עם המחלה, עם תוצאות שונות. כדי להעמיד את ההתפתחויות בישראל בפרספקטיבה זו, מציג תרשים 3⁵ את מספר המתים מ-Covid 19 (במונחי זרם) ביחס למיליון תושבים, לאורך זמן. התרשים משווה בין ישראל לבין חמש מדינות המציגות דרכים שונות של התמודדות עם המגפה: יפן, גרמניה, בריטניה, שבדיה, וארצות הברית. חשוב לציין כי בין מדינות אלו קיימים הבדלים משמעותיים במערכות הבריאות ובמערכות האפידמיולוגיות.⁶

תרשים 3

ניתן לראות כי המגפה התפרצה בכל המדינות בסביבות אמצע מרץ. יפן בלמה את המגפה עד מחצית אפריל ושוב ממחצית מאי, ולמעשה לא נפגעה מהמגפה כמעט כלל. בארה"ב, בריטניה, גרמניה וישראל הופעלו צעדי בלימה על ידי הממשלה באמצע אפריל, והיקף גידול התמותה דעך לאורך זמן. ככל שהיקף המגפה היה חריף יותר בגל הראשון, כך התארך משך זמן הדעיכה. עם שחרור המגבלות, בסביבות יוני-יולי, פרץ גל שני בישראל ובארה"ב. שבדיה כמעט שלא הפעילה צעדים ממשלתיים, בפרט לא סגר כללי, אך נתנה המלצות לריחוק חברתי ואסרה על התקהלויות. הפרופיל של שבדיה בתרשים 3 דומה לזה של בריטניה, עם רמה נמוכה יותר בחלק העיקרי של הגל, אך גם דעיכה ארוכה יותר.

נכון לסוף ספטמבר, ניתן לאפיין שלוש קבוצות של מדינות בסיכום שיעור התמותה הכולל (כלומר הסכימה של הנתונים בתרשים 3, שאינה מוצגת): בקבוצה הגבוהה יותר, ארה"ב ושבדיה, עם כ-600 מיליון איש למיליון, ובריטניה עם 630 מיליון; המשותף להן הוא שהגיבו באיחור, או לא הגיבו בסגר ממשלתי. בקבוצה הבינונית נמצאות ישראל, עם 174 איש למיליון, וגרמניה עם 113 איש למיליון; הדינמיקה שהביאה אותן למקום זה שונה מאוד, וישראל חלפה על פני גרמניה בשיעור התמותה. השלישית היא יפן עם כ-12 איש למיליון. ההסברים שניתנו לשיעורים הנמוכים מאוד ביפן קשורים הן לתגובה הממשלתית (סגרים מוקדמים), הן למערך המעקב האפידמיולוגי המפותח, הן להרגלים אישיים-חברתיים (פחות נגיעה, שימוש נרחב במסכות, ורמת היגיינה גבוהה), והן לגורמים ביולוגיים.

לישראל היעדר מוחלט של ניסיון ואסטרטגיה מגובשת להתמודדות עם מגפות נשימתיות, כמו שקיים למשל ביפן. מערכת הבריאות הציבורית שלה היא בעלת משאבים מוגבלים ביחס למקובל בעולם המפותח. עם זאת

⁵ מתוך אתר Financial Times, נתונים ל-29 בספטמבר 2020. ראו <https://ig.ft.com/coronavirus-chart/?areas=deu&areas=swe&areas=ISR&areas=usa&areas=gbr&areas=jpn&areasRegional=usny&areasRegional=usca&areasRegional=usfl&areasRegional=ustx&areasRegional=usny&areasRegional=usca&byDate=1&cumulative=0&logScale=1&perMillion=1&values=deaths>

⁶ ההשוואה הנעשית כאן היא תיאורית בעיקרה; אין זה כאן המקום לניתוח מעמיק של ההבדלים.

בהתמודדות עם הגל הראשון, שהתאפיינה בסגירת גבולות ובסגר כלכלי, הגיבה ישראל מוקדם וסיימה את הגל הראשון בשיעור תמותה כללי נמוך יחסית. חשוב לציין שההצלחה הזו לא לוותה בהקמה של מערך חקירות אפידמיולוגיות במימדים הנדרשים. ארבעה חודשים לתוך המגפה, בהתרחבות הגל השני באמצע יולי, התאפיינה ישראל ברמות נמוכות מאוד של חוקרים לנפש ביחס למדינות מפותחות אחרות.⁷ המצב הזה עשוי להשתפר, אם התכנית להכשרה והעסקה של חוקרים נוספים⁸ תיושם במלואה ואפילו אז כמות החוקרים לנפש בישראל תתקרב לזו שהייתה בגרמניה כבר באמצע יולי. ניתן להניח שהעדר מערך חקירות אפידמיולוגיות נרחב תרם גם הוא להתפתחות הגל השני.

בלוח 2 מובאים צעדי המדיניות הכלכלית המרכזיים.

לוח 2

הצעדים הממשלתיים נועדו לסייע לפירמות ומשקי בית עם הירידה הדרסטית בפעילות הכלכלית בעקבות הפעלת צעדי מדיניות בריאות הציבור שתוארו לעיל. זו כללה ירידה של בין 7.5% ל-10.5% בצריכה הפרטית ובין 7.5% ל-8.5% בהשקעות על פני שנת 2020 כולה, לפי אומדני בנק ישראל מסוף אוגוסט 2020.⁹ בתחום הפיסקאלי מדובר בסיוע לפירמות, כולל בהלוואות, ובסיוע למשקי בית, כולל בתשלומי רווחה ובמענקים ישירים. בנק ישראל אומד את ההרחבה הפיסקאלית המשתמעת מצעדים אלו בעלייה של 7% בצריכה הציבורית בשנת 2020. בתחום המוניטארי מדובר בצעדים מרחיבים, כולל הפחתת ריבית ורכישת אגרות חוב, בעיקר ממשלתיות. בסיכומו של דבר צפוי התמ"ג לרדת בין 4.5% ל-7% בשנה כולה, לפי אותם האומדנים. נציין כי טרם בוצע ניתוח משמעותי בספרות המחקרית, מעבר לניתוח של סטטיסטיקה תיאורית, שיאפשר למדוד את ההשפעה של מדיניות בריאות הציבור על הפעילות הכלכלית ורווחת הציבור.

⁷ <https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/research-report-n158-epidemiological-investigation-arrays>

⁸ <https://m.knesset.gov.il/Activity/committees/ForeignAffairs/News/Pages/pr090920.aspx>

⁹ ראו <https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/24-8-2020a.aspx>

3. המודל האפידמיולוגי

המודל להלן הוא מודל מרכזי בתחום האפידמיולוגיה ומפורט ב- Bar-On, Baron, Cornfeld, Milo and Yashiv (2020), שם מוסברת הלוגיקה שלו, ההקשר בספרות הרלבנטית, כמו גם מיקומו במחקר הכלכלי של COVID-19. המודל מתאר את התפשטות המגפה בחטיבה אפידמיולוגית ואת הדינמיקה של החולים בתוך מערכת בתי החולים בחטיבה קלינית. לאחר הצגת המודל נתאר להלן את ההשלכות הכלכליות ואת כיוול המודל.

א. החטיבה האפידמיולוגית

חלק זה של המודל פותח במקור לפני כמעט 100 שנים על ידי Kermack and McKendrick (1927). המודל מציג אנשים כמצויים באחד מארבעה מצבים:

א. S – רגיש

ב. E – חשוף

ג. I – נשא

ד. R – פתור

להלן נתאר את המעבר בין המצבים באופן שיאפשר שימוש במשוואות דיפרנציאליות. המצב הראשון S הוא המצב הבסיסי של כל האוכלוסייה הלא מחוסנת. אדם במצב זה נדבק בוירוס בקצב β ועובר למצב E. במצב אחרון זה האדם עדיין אינו מדבק אחרים והוא נקרא תקופת החביון. בהסתברות מעבר σ הוא עובר לשלב הבא, I, כאשר ממוצע הזמן, $\frac{1}{\sigma}$, הוא 3 ימים. במצב I הנשא כבר מדביק אחרים. בהסתברות γ עובר אדם ממצב I למצב R כאשר ממוצע הזמן, $\frac{1}{\gamma}$, הוא 4 ימים. מקובל להגדיר מקדם הדבקה $\mathcal{R} = \frac{\beta}{\gamma}$ שהוא פרמטר מרכזי מאד בכל ניתוח אפידמיולוגי.

הערכים המספריים הנ"ל כמו גם ערכים שונים בהם נשתמש, ובפרט \mathcal{R} , נדונים להלן בסעיפים 4 ו-5 וערכיהם לקוחים ממחקרים קיימים ומאמידה שלנו. להלן המשוואות המתארות חלק זה של המודל.

כדי לתת תיאור מדויק יותר של זמן השעות בכל מצב נחלק את המצבים E ו-I לשני תתי-תאים כל אחד. כ- Bar-On, Baron, Cornfeld, Milo and Yashiv (2020) מוסברת הלוגיקה לחלוקה זו. חלוקה זו יוצרת צורך להכפיל את הסתברויות המעבר בין המצבים, כפי שנראה בשש המשוואות הדיפרנציאליות הבאות, המסכמות את המבנה שתואר לעיל.

$$\dot{S}(t) = -\beta(t) \cdot (I_1(t) + I_2(t)) \cdot S(t) \quad (1)$$

$$\dot{E}_1(t) = \beta(t) \cdot (I_1(t) + I_2(t)) \cdot S(t) - 2 \cdot \sigma \cdot E_1(t) \quad (2)$$

$$\dot{E}_2(t) = 2 \cdot \sigma \cdot E_1(t) - 2 \cdot \sigma \cdot E_2(t) \quad (3)$$

$$\dot{I}_1(t) = 2 \cdot \sigma \cdot E_2(t) - 2 \cdot \gamma \cdot I_1(t) \quad (4)$$

$$\dot{I}_2(t) = 2 \cdot \gamma \cdot I_1(t) - 2 \cdot \gamma \cdot I_2(t) \quad (5)$$

$$\dot{R}(t) = 2 \cdot \gamma \cdot I_2(t) \quad (6)$$

ב. החטיבה הקלינית

חלק זה של המודל מתאר את מהלך המחלה מבחינה קלינית. נשאי המחלה נמצאים במצב אינקובציה (שנסמנו ב-P) במשך זמן $1/\theta_p$ בממוצע. חלק η מהם הופכים להיות נשאים א-סימפטומטיים והשאר מפתחים סימפטומיים (ויסומנו M). מקבוצה אחרונה זו ξ מתאשפזים (יסומנו H). מהמאושפזים חלק π מועברים לטיפול נמרץ (בסימון X). המאושפזים בטיפול נמרץ. נפטרים בהסתברות $\delta(\cdot)$ אותה ננסח כדלקמן:

$$\delta(X(t), \bar{X}) = \delta_1 + \delta_2 \cdot \frac{\mathbb{I}(X(t) > \bar{X}) \cdot (X(t) - \bar{X})}{X(t)} \quad (7)$$

כאשר \bar{X} מסמל תפוסה מלאה של המחלקה לטיפול נמרץ ו- \mathbb{I} מסמן את פונקציית האינדיקטור. בכל שלב שהוא עשוי החולה להחלים (לעבור למצב C).

המשוואות הבאות מתארות את החטיבה הזו.

$$\dot{P}(t) = \beta(t) \cdot (I_1(t) + I_2(t)) \cdot S(t) - \theta_p \cdot P(t) \quad (8)$$

$$\dot{M}(t) = (1 - \eta) \cdot \theta_p \cdot P(t) - \theta_M \cdot M(t) \quad (9)$$

$$\dot{H}(t) = \xi \cdot \theta_M \cdot M(t) - \theta_H \cdot H(t) \quad (10)$$

$$\dot{X}(t) = \pi \cdot \theta_H \cdot H(t) - \theta_X \cdot X(t) \quad (11)$$

$$\dot{D}(t) = \delta(X(t), \bar{X}) \cdot \theta_X \cdot X(t) \quad (12)$$

כאשר θ_x ו- $\theta_H, \theta_M, \theta_P$ הם הפרמטרים המגדירים את משכי הזמן העוברים בין הדבקה להופעת הסימפטומים, בין הופעת הסימפטומים לבין האישפוז, בין האישפוז לבין הקבלה למחלקה לטיפול נמרץ ובין הקבלה למחלקה לטיפול נמרץ לבין המוות, בהקבלה. $\dot{D}(t)$ הוא השינוי במלאי המתים.

4. אמידה של מקדם ההדבקה בישראל

מקדם ההדבקה אינו נצפה ישירות בנתונים אך קיימות שיטות לאמוד אותו. אנו משתמשים בשיטה המתבססת על המאמר של Jones and Villaverde (2020). הרעיון של השיטה הוא, שבהינתן קבועי הזמן העיקריים של המחלה, קיים קשר הדוק בין כמות המתים הנוספים מדי יום לבין קצב ההדבקה בתקופות קודמות. קשר זה נוצר כיון שבמודל האפידמיולוגי, מהסוג שהצגנו, עובר הפרט שרשרת של מצבים בסדר מוגדר, כאשר השרשרת מתחילה מהדבקה ומסתיימת במוות או הבראה. המשך הממוצע של השהות בכל מצב והסתברויות המעבר ידועים. אנו מתאימים השיטה למודל שלנו עם קבועי זמן כפי שהם מופיעים בלוח 2. נסמן עתה ב- $d(t)$ את מספר המתים החדשים ביום t . נסמן ב- $\Delta d(t) = d(t) - d(t-1)$ את הפרש במספר המתים החדשים בין יום t ליום הקודם לו $t-1$. לבסוף, נסמן ב- $\Delta\Delta d(t) = \Delta d(t) - \Delta d(t-1)$ את הפרש ההפרשים. ניתן להראות (ראו נספח א') שבמודל שהוצג בסעיף 3 מתקיימת מערכת משוואות בשני נעלמים $\beta(t), S(t+1)$:

$$\beta(t) = \frac{N}{S(t)} \cdot \left[\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\frac{\Delta\Delta d(t+4) + \Delta d(t+3)}{\theta} + \Delta d(t+3)}{\frac{\Delta d(t+2)}{\theta} + d(t+1)} + \left(1 - \frac{1-\gamma}{\sigma}\right) \cdot \frac{\frac{\Delta\Delta d(t+3) + \Delta d(t+2)}{\theta} + \Delta d(t+2)}{\frac{\Delta d(t+2)}{\theta} + d(t+1)} + \gamma \right] \quad (13)$$

$$S(t+1) = S(t) \cdot \left[1 - \beta(t) \cdot \frac{1}{\mu\gamma N} \cdot \left(\frac{\Delta d(t+2)}{\theta} + d(t+1) \right) \right] \quad (14)$$

התנאי ההתחלתי למערכת הנ"ל הוא שמספר הרגישים בתקופה הראשונה של המגפה מתקרב לכלל האוכלוסייה: $S(0) \cong N$. עם תנאי זה ניתן לפתור את המערכת קדימה עבור כל יום t , כאשר תחילה מוצאים את קצב ההדבקה $\beta(t)$ מהמשוואה (15), ואז מציבים במשוואה (16) כדי למצוא את מספר הרגישים בתקופה הבאה, $S(t+1)$. יש לשים לב לכך שממבנה המשוואות, הנובע מהרעיון של "לגלגל" את המודל אחורה מהמוות להדבקה, עם הנתונים של המתים היום $d(t)$ ניתן למצוא את קצב ההדבקה 4 ימים קודם לכן. לבסוף, ברגע שהתוואי של קצב ההדבקה על פני זמן כבר מחושב, ניתן לקבל את התוואי של מקדם ההדבקה כדלקמן:

$$\mathcal{R}(t) = \frac{\beta(t)}{\gamma} \quad (15)$$

כאמור, מאפשרת מתודולוגיה זו למצוא את מקדם ההדבקה על סמך נתוני התמותה. בדרך כלל, היתרון בשימוש בנתוני התמותה הוא שנתונים אלו נחשבים ליותר אמינים ומייצגים טוב יותר את היקף המגפה בהשוואה לנתוני החולים התלויים בהיקף הבדיקות ושאינם מכסים את החולים האסימפטומטיים. אך, במקרה הספציפי של ישראל, נתוני התמותה הם יחסית נמוכים ומסתכמים בנפטרים בודדים ביום ולכן הסדרה $d(t)$ הינה מאוד רועשת. בנוסף, היקף הבדיקות בארץ היה רחב יחסית, במיוחד מיולי ואילך. לייחודיות זו של ישראל יש שתי השלכות מעשיות לניתוח שלנו:

- כאשר מסתמכים על נתוני התמותה לחישוב מקדם ההדבקה, נחליק את סדרת ה- $d(t)$ על ידי חישוב ממוצע נע עם חלון של 7 ימים ואחר על ידי שימוש ב-HP-filter עם מקדם החלקה גבוה של 4000.
- בנוסף אנו משתמשים בשיטה דומה לזו של Jones and Villaverde (2020) המסתמכת על נתוני נשאים $I(t)$ במקום מתים. ניתן לראות (ראו נספח א') כי מתקיימת מערכת של שתי משוואות עם שני נעלמים $\beta(t), S(t + 1)$:

$$\beta(t) = \frac{N}{S(t)} \cdot \left[\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\Delta I(t+2)}{I(t)} + \left(1 - \frac{1-\gamma}{\sigma}\right) \cdot \frac{\Delta I(t+1)}{I(t)} + \gamma \right] \quad (16)$$

$$S(t + 1) = S(t) \cdot \left[1 - \beta(t) \cdot \frac{I(t)}{N} \right] \quad (17)$$

מערכת המשוואות (16)-(17) מאפשרת למצוא את התואי של $\beta(t)$ בהינתן הסדרה $I(t)$, סדרת ההפרשים $\Delta I(t)$ וגודל האוכלוסיה N . תנאי ההתחלה הוא שוב $S(0) \cong N$. ביישום של שיטה זו, כדי להיפטר מהרעש, אנו מחליקים את סדרת $I(t)$ על ידי שימוש בממוצע נע עם חלון של 7 ימים ואחר כך על ידי שימוש ב-HP-filter עם מקדם החלקה נמוך יותר, של 1600.

תרשים 4

תרשים 4 מציג את התואי של מקדם ההדבקה $\mathcal{R}(t)$ המחושב בשתי השיטות המתוארות לעיל: על סמך נתוני המתים ועל סמך נתוני הנשאים¹⁰. התואי המוצג מתחיל ממחצית חודש מרץ. לפני כן, ניסתה הממשלה למנוע את כניסתו והתפשטותו של נגיף הקורונה בארץ על ידי החלת בידוד נקודתי על התיירים הנכנסים

¹⁰ הנתונים הם אותם הנתונים של משרד הבריאות, ששימשו לעיל בתרשים 1.

לארץ מיעדים מובחרים (ראו לוח 1 לעיל). אולם, הצעדים האלו לא הצליחו למנוע את התפשטות המגפה. ממחצית מרץ חל גידול חד במספר הנשאים המאומתים ומקדם ההדבקה הגיע לרמה גבוהה מאוד, מעל 2.5. לנוכח ההתפרצות, הגיבה הממשלה מהר מאוד, בצעדי מדיניות חריפים של סגר, החל ב-11 מרץ, בפרט לגבי מערכת החינוך, ועד לסגר מלא ב-25 למרץ (ראו לוח 1). ניתן לראות שצעדים אלו אפשרו לישראל להשתלט מהר מאוד על המגפה, כפי שניתן לראות בירידה של הנשאים החדשים בסוף מרץ-תחילת אפריל בתרשים 1 וגם בירידה חדה של מקדם ההדבקה $R(t)$ אל מתחת ל-1 בתרשים 4. במחצית השנייה של אפריל, החלה הממשלה לפתוח את המשק בהדרגה, בעוד המחלה נשארת בשליטה עם $R(t)$ קטן מ-1. אך לקראת סוף מאי, לאחר הסרת מגבלות נוספת, ופתיחת מקטעים נוספים של המשק, עלה מקדם ההדבקה שוב בחדות והחל הגל השני. בתרשים 4 ניתן לראות שלפי שני האומדנים חוזר מקדם ההדבקה להיות מעל 1 וממשיך לעלות גם בתחילת חודש יוני. במהלך החודשים יוני ויולי הפעילה הממשלה צעדי מדיניות שונים כדי לנסות להשתלט על המגפה ולמתן את העלייה במקדם ההדבקה על מנת להחזיר אותו לערך של 1. הצעדים כללו הכרזה על שכונות וערים שהתגלו כמוקדי התחלואה כאזורים מוגבלים, הגבלות בפעילות הספורט והפנאי, והגבלות בתחבורה הציבורית. ניתן לראות שצעדים אלו בסופו של דבר הצליחו להגביל את קצב התפשטות המגפה ומקדם ההדבקה התייצב סביב 1 החל מסוף חודש יולי. ההתייצבות הזאת ניכרת גם בנתוני הנשאים הנעים בסביבות 1400 מקרים חדשים ביום בתחילת חודש אוגוסט. במהלך חודש זה שבה המגפה לעלות והיקף הנדבקים היומי (בממוצע שבועי) הגיע עם תחילת שנת הלימודים ל 2500 מקרים חדשים ליום. יישום התכנית לשימוש בסגרים מקומיים על פי היקף התחלואה שגובשה על ידי הגופים המקצועיים, נדחה כמה פעמים, והופעל באיחור ובצורה מוגבלת מאוד רק בשבוע הראשון של ספטמבר, בעת סגירת מאמר זה הוחלפה התכנית בסגר מקיף בשל היקף תחלואה שהגיע אל מעל ל-7000 חולים מאומתים חדשים ביום, וחשש לאי ספיקה של מערכת הבריאות.

שני האומדנים למקדם ההדבקה – לפי מספר המתים ולפי מספר הנשאים – משקפים אותה הדינמיקה על פני זמן. ההבדלים בין המדדים נובעים מהבדלים איכותיים בין הסדרות העיתיות עליהן הם מתבססים. כאמור, סדרת המתים הינה מאוד תנודתית, עם הרבה ערכים אפסיים, ובאופן כללי היא בעלת ערכים יומיים נמוכים מהערכים של כמות הנשאים בשני סדרי גודל. לכן גם האומדן למקדם ההדבקה הנגזר ממספר המתים הוא תנודתי יותר מאשר האומדן למקדם ההדבקה הנגזר ממספר הנשאים. יחד עם זאת, שני האומדנים עקביים זה עם זה (מתאם של 0.87) ועם צעדי המדיניות שננקטו.

5. סימולציה של מדיניות בריאות הציבור בישראל

בסעיף זה נדמה את פעילות הממשלה בטיפול בגל הראשון של המגפה באמצעות שימוש במודל שהוצג בסעיף 3 לעיל. בהמשך המאמר נשווה את המדיניות בפועל לחלופות שונות.

א. הנחות הסימולציה

הסימולציה של המדיניות בפועל בוצעה תחת ההנחות הבאות: מקדם ההדבקה בתחילת המגפה הינו $R_0 = 2.4$, מקדם ההדבקה בזמן הסגר הינו $R_L = 0.7$, מקדם ההדבקה לאחר הסגר הינו $R_W = 1.5$. גודל הגרעין הראשוני של ההדבקה הינו 97 אנשים שנדבקו, המחולקים בין השלבים השונים באופן המתאים לקצב הגידול הראשוני. תחילת הסימולציה היא בתאריך 27 פברואר 2020, מועד הכניסה לסגר הינו 28 ימים לאחר תחילת הסימולציה, בתאריך 26 מרץ 2020, ומועד היציאה מהסגר הינו 52 ימים אחרי כן, בתאריך 17 מאי 2020.

לוח 3 מציג את כיוול המודל. חלקים א' ובי' שלו מתבססים על הספרות האפידמיולוגית ועל הספרות הקלינית, והם נדונים בהרחבה ב- Bar-On, Baron, ו Bar-On, Sender, Flamholz, Phillips, and Milo, (2020). Cornfeld, Milo and Yashiv (2020). בחלק ג' נכיל את מספר מיטות טיפול הנמרץ בישראל. בינואר 2020 הוא עמד על 11764¹¹, אך לצורך ניתוח המודל הרחבנו מספר זה ל-1000 מיטות כדי לשקף את מאמצי ההצטיידות לקראת המגפה. בחלקים האחרים של חלק ג' של הלוח נדון בהמשך המאמר במקום הרלבנטי.

לוח 3

ב. הקשר בין הסימולציה להתפתחויות בפועל

סדרת הנתונים העיקרית שהמודל מדמה הינה סדרת התמותה, שכן בשלבים הראשונים של כל מגפה היא הסדרה התופסת את מימדי המגפה באופן הממצה ביותר. שאר הנתונים, במיוחד היקף הנשאים החדשים, רגיש מאוד לזמינות הבדיקות ולטיבן. על מנת להתמודד עם הרעש בנתונים, נתוני התמותה הינם ממוצע מרכזי נע של שבועיים. כדי להשוות בין המודל למציאות, מוחלקים נתוני המודל באופן זהה. תרשים 5 מציג את נתוני התמותה של ישראל ואת נתוני התמותה החזויים על פי המודל.

תרשים 5

עד היום ה-144, בתאריך 19 יולי 2020, המתאם בין הסדרות הללו הוא 0.987. לאחר מכן ננקטו במציאות צעדים שנועדו לבלימת הגל השני ואילו המודל ממשיך עם הגל השני ללא התערבות.

¹¹ <https://www.health.gov.il/PublicationsFiles/beds2020.pdf>

תרשים 6 מציג את נתוני הנשאים המאומתים החדשים בישראל ואת הניבוי של המודל.

תרשים 6

ניתן לראות, שעל פי המודל, בגל הראשון היה רק זיהוי חלקי של היקף התחלואה; בעוד הנתונים מלמדים שבשיא הגל הראשון היקף הנדבקים היומי הגיע לכ-500 איש, הרי על פי נתוני המודל נתוני התחלואה היו פי 3 גבוהים יותר. לתופעה זאת יש שלושה הסברים אפשריים. האחד הוא ששיעור התמותה מסך הנשאים בישראל היה גבוה מאשר במודל וכך נפטרו יותר אנשים מסך החולים. ההסבר השני הינו שהתחלואה בישראל כללה מספר גבוה יותר של חולים אסימפטומטיים. ההסבר השלישי הינו שהיקף הבדיקות לא כיסה את היקף התחלואה, והוא המתקבל ביותר על הדעת. זאת כיון שהחל מהיום ה-53 ועד תחילת צעדי הבלימה ביום ה-144, המתאם בין סדרת החולים המאומתים במציאות ובמודל הוא 0.979, כלומר לאחר שמערכות האיתור והיקף הבדיקות בישראל התרחבו מאד, המודל והמציאות דומים לא רק במספר המתים אלא גם בהיקף התחלואה הכללי.

6. מודל מורחב של מדיניות אופטימלית

כדי להתייחס למדיניות אופטימלית נכניס למודל את שוק העבודה והתוצר ונתייחס למושג של מתכנן חברתי מרכזי הבוחר במדיניות המתייחסת הן לנושא בריאות הציבור והן למצב המשק.

א. מודל של מתכנן מרכזי

המתכנן המרכזי מביא למינימום את פונקציית ההפסד הבאה:

(18)

$$\min \int_{T_V=0}^{\infty} f(T_V) \cdot \left(\int_{t=0}^{T_V} e^{-rt} \cdot \left(\frac{Y(t)}{N(t)} \cdot (N^{SS} - N(t)) + (\chi_1 + \chi_2) \cdot \dot{D}(t) + R_D(T_V) + R_Y(T_V) \right) \right)$$

פונקציית ההפסד, מהוונת בריבית r , כוללת הן את אובדן התוצר Y (כתוצאה מתת-תעסוקה, בזמן t $N(t)$) ביחס לשיווי משקל טווח ארוך (N^{SS}) והן את אובדן ערך החיים. ביטוי אחרון זה כולל הן את ערך החיים הכלכלי χ_1 כפי שיחושב מטה והן את הערך הלא-כלכלי χ_2 המשקף את הרגישות של המתכנן המרכזי לאובדן חיים במגפה, במובן שהוא יותר רחב מערך חיים כלכלי נקי. הפונקציה $f(T_V)$ מסמנת את צפיפות ההסתברות של זמינות החיסון בתקופה T_V , כאשר T_V מסמן את נקודת הזמן בה יהיה זמין חיסון נגד הנגיף. ההנחה היא שברגע שהחיסון יהיה זמין, מספר האנשים הרגישים יפול מיד ל-0 (כלומר כל הרגישים יתחסנו מיד והחיסון ייתן להם הגנה מושלמת ובלתי מוגבלת בזמן). אנו מניחים שפיתוח החיסון בא בעקבות תחרות בין חברות רבות, בעלות הסתברות זהה לפתח חיסון בכל רגע נתון. לפיכך עיתוי זמינות החיסון בפועל יתפלג כמינימום של זמני הפיתוח האפשריים של כל החברות המשתתפות בתחרות. את ההתפלגות הזאת ניתן לאפיין פרמטרית כהתפלגות Gumbel עם שני פרמטרים μ_G, σ_G . הדינמיקה אחרי T_V מתייחסת לאנשים המסיימים את מחלתם ולכן עוד עלולים למות (עלות שאריתית $R_D(T_V)$) ובכך גם לגרוע מהתוצר הפוטנציאלי (עלות שאריתית $R_Y(T_V)$).

המתכנן המרכזי מביא את פונקציית ההפסד למינימום על ידי בחירה בשלושה תאריכים T_0, T_1, T_2 , כאשר T_0 מתחיל סגר כללי הנמשך עד T_1 ומוחלף באסטרטגיית יציאה מחזורית, המוסברת להלן, הנמשכת עד T_2 . מהנקודה T_2 ואילך המתכנן אינו מתערב. להלן נבחן חלופות שונות למדיניות זו.

ב. אסטרטגיית יציאה מחזורית

חלופות המדיניות הנבחנות נעשות בפריזמה של אסטרטגיית יציאה מחזורית. זו הוצעה על ידי Karin et al (2020). הכוונה היא למדיניות בה בכל תקופה של 14 יום יש פתיחה של המשק למשך k ימים וסגירה למשך $14-k$ ימים. הפריסה של ימי סגר וימי עבודה על פני ימי השבוע מתוארת בלוח 4.

לוח 4

הרציונל למדיניות זו הוא כפול: ראשית הוא מתבסס על העובדה שקיימת תקופת חביון בת 4 ימים בהם נשא של הנגיף אינו מדביק אחרים. לפיכך בזמן זה ניתן לאפשר לנשאים לא להיות בסגר. שנית, ההגבלה של זמן הפתיחה לחלק מהימים כל שבועיים, כאשר בכל שאר הזמן האוכלוסייה היא בסגר, פרושו של דבר סגר חלקי ומניעת הידבקות. כיוון שכל פרק זמן של שבועיים מחולק באופן נתון בין עבודה לסגר, מתקבל למעשה מקדם הדבקה ממוצע, המשקלל את מקדמי ההדבקה של תקופת הסגר ותקופת העבודה, לפי האורך היחסי שלהם. משני נימוקים אלו יכול מקדם ההדבקה (הממוצע) לרדת אל מתחת ל-1. Karin et al (2020) מדגימים חישובים של מקדם ההדבקה הממוצע ודנים לעומק באסטרטגיות המחזוריות הללו והשפעתן על מקדם ההדבקה האפקטיבי.

נציין כי כאשר $k=0$ זהו מקרה פרטי של המדיניות הנפוצה של סגר כללי.

בניתוח להלן אנו בוחנים סוגים שונים של אסטרטגיות מחזוריות הנבדלים במספר ימי הפתיחה (W) בהשוואה למספר ימי הנעילה (L). הנחת העבודה היא שהמגפה מתחילה עם $\mathcal{R} = 2.4$, וכאשר מטיל המתכנן סגר מקדם ההדבקה יורד לרמה של $\mathcal{R}^L = 0.7$. אם נמשך הסגר שבועיים לפחות, יורד מקדם ההדבקה בכל פתיחה לעבודה ל- $\mathcal{R}^W = 1.5$.

ג. שוק העבודה והתוצר

אנו מניחים כי מספר העובדים בכל יום $N(t)$ נתון ע"י:

$$N(t) = l \cdot \rho \cdot (1 - D(t) - X(t) - H(t) - \phi \cdot M(t)) \quad (19)$$

כאשר

$$0 < \ell < 1$$
 היא שיעור התעסוקה מכלל האוכלוסייה

$$0 < \rho \leq 1$$
 היא שיעור העובדים בפועל בהינתן מגבלות, כגון סגר.

$0 \leq \phi \leq 1$ הוא שיעור החולים הסימפטומטיים שאינם עובדים. אנחנו מניחים ש- $\phi = 1$, כלומר כל מי שמפתח סימפטומים נכנס לבידוד מיד ואינו עובד.

אנחנו מניחים פונקציית ייצור לינארית:

$$Y(t) = A \cdot N(t)$$

בטווח ארוך, ללא מגפה, $N^{SS} = l$. ננרמל את התוצר ל-1:

$$Y^{SS}(t) = A \cdot l = 1$$

ולכן:

$$A = \frac{1}{l}$$

ד. ערך כלכלי לחיים

מקובל לחשב ערך כלכלי לחיים בהסתמך על גישות שונות. בגישת ההון האנושי, עושים זאת על סמך נתוני שכר במשלחי יד שונים (ראו, לדוגמא (Viscusi and Masterman (2017)). בגישת כלכלת רווחה, החישוב מתבסס על העדפות נגלות או מוצהרות של הפרט (ראו לדוגמא, בהקשר של משבר הקורונה, מאמרם של (Hall, Jones and Klenow (2020)). בגישת מחקר תחבורה, נעשה החישוב על סמך העלות החברתית של הרוגים בתאונות דרכים. שמואלי וניסן-אנגלצין (2008) דנים בגישות אלו ומביאים אומדנים לישראל.

במאמר זה נחשב את ערך החיים χ_1 של הנפטר הממוצע מקורונה כדלקמן:

$$\chi_1 = \left(\text{תוחלת החיים המותנה של הנפטר הממוצע} \right) \cdot \frac{\frac{VSL}{\text{תוחלת החיים בלידה}}}{\frac{\text{תמ"ג}}{\text{אוכלוסיה}}} \quad (20)$$

כאשר VSL הוא הערך הכלכלי (או הסטטיסטי) של חיים שלמים במונחים כספיים, $\frac{VSL}{\text{תוחלת החיים בלידה}}$ מבטא

את הערך הכלכלי של שנת חיים אחת, וכאשר מחלקים אותו בתוצר לנפש מקבלים את הערך של שנת חיים אחת במונחים של תוצר לנפש. לבסוף, ערך זה מוכפל בכמות השנים הצפויה שנותרה לחולה הקורונה הממוצע לו היה נשאר בחיים. כך מקבלים את הערך הכלכלי של שנות החיים שאבדו במקרה הממוצע של מוות מקורונה, במונחים של תוצר לנפש.

ה. כיוול

נשתמש בערכים המובאים בלוח 3 לעיל. לגבי הפרמטרים בחלק ג' של הלוח, ההנמקה לשימוש בערכים בלוח היא כדלקמן.

נקבע את ערך החיים χ_1 בישראל באופן הבא: לפי משרד הבריאות¹² הגיל הממוצע של הנפטרים מקורונה עומד על 80.7 נכון ל-4.6.2020. לפי לוחות התמותה של הלמ"ס¹³ בגיל 81 עומדת תוחלת החיים המותנה על 8.5 שנים לגברים ו-9.4 שנים לנשים (על-סמך נתונים מהשנים 2014-2018). לפיכך נשתמש בתוחלת חיים מותנה של 9 שנים. ארגון הבריאות העולמי WHO ממליץ להשתמש בערך שנת חיים של 4 יחידות של תוצר לנפש, לפיכך:

$$\chi_1 = (\text{תוחלת החיים המותנה של הנפטר הממוצע}) \cdot \frac{\frac{VSL}{\text{תוחלת החיים בלידה}}}{\frac{\text{תמ"ג}}{\text{אוכלוסיה}}} = 9 \cdot 4 = 36$$

לגבי הערך של הפרמטר ρ נשתמש בנתוני שוק העבודה. תרשים 7 מציג את נתוני הלמ"ס על אחוז הנעדרים זמנית מעבודה מתוך כוח העבודה בשל הקורונה.

תרשים 7

בנקודה הגבוהה ביותר בתרשים שרר סגר חמור וכ-35% מכוח העבודה נעדרו זמנית מעבודתם. מספר זה מביא לכיול של $\rho = 0.65$ שהוא גם הערך בו משתמשים (Kaplan, Moll, and Violante (2020) לגבי המשק האמריקאי.

בפונקציית ההפסד מופיעה התפלגות Gumbel. זו מתייחסת לזמינות החיסון בפועל, המתפלגת כמינימום של זמני הפיתוח האפשריים. להתפלגות זו שני פרמטרים μ_G, σ_G אותם אנחנו מכיילים כך ש: (א) תוחלת הזמן של זמינות החיסון שווה לשנה וחצי מתחילת המגפה, המתאים להערכות רווחות בקרב העוסקים בפיתוח; (ב) הסיכוי שהחיסון יהיה זמין תוך פחות משנה מתחילת המגפה הוא רק 1%.

¹² <https://www.meida.org.il/wp-content/uploads/2020/06/background-diseases-data.pdf>

¹³ <https://www.cbs.gov.il/he/publications/Pages/2020/%D7%9C%D7%95%D7%97%D7%95%D7%AA-%D7%AA%D7%9E%D7%95%D7%AA%D7%94-%D7%A9%D7%9C%D7%9E%D7%99%D7%9D-%D7%A9%D7%9C-%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C-2018-2014.aspx>

7. סימולציה של מדיניות אופטימלית

בסעיף זה נשתמש במודל של סעיף 6 לעיל כדי לבחון מדיניות אופטימלית. האופטימיזציה מבוצעת תחת ההנחות הבאות: מקדם ההדבקה בתחילת המגפה הינו $\mathcal{R}_0 = 2.4$, מקדם ההדבקה בתקופה של סגר הינו $\mathcal{R}_L = 0.7$, מקדם ההדבקה כאשר המשק אינו בסגר אך כאשר כבר התקיים סגר אחד הינו $\mathcal{R}_W = 1.5$; ערכים אלו נדונים ב-Alon et al (2020). גודל הגרעין הראשוני של ההדבקה הינו 0.001% מהאוכלוסייה המחולקים בין השלבים השונים באופן המתאים לקצב הגידול הראשוני. ערך כלכלי לחיי אדם, χ_1 שנידון בסעיף 6' לעיל, הינו 36 שנות תוצר לנפש. בחנו כאן שתי חלופות: באחת, המתכנן מביא בחשבון רק ערך זה, ללא תוספת; בשנייה, בפני המתכנן עומד ערך נוסף, χ_2 שאינו כלכלי, של חיי אדם המוערך ב-64 שנות תוצר לנפש. חלופה שנייה זו מביאה בחשבון שיקולים חברתיים-פוליטיים הקשורים בתמותה ובעומס על מערכת הבריאות, שאינם נמדדים בערך הכלכלי של חיי אדם. שאר הערכים במודל מכוילים לפי הדיון בסעיפים 5 ו-6 לעיל.

לוח 5 מציג את תוצאות הסימולציה לאסטרטגיות שונות המוצגות בעמודה השמאלית. הללו כוללות אי התערבות, סגר מתמשך, והאסטרטגיות המחזוריות עם $k=0,3,4,5,6,7,8,9,10$. העמודות כוללות את המועדים של תחילת הסגר (T_0), תחילת האסטרטגיה המחזורית (T_1) ושחרור מלא (T_2). אחר כך מוצג ערך פונקציית העלות באופטימום (V), שני מרכיביה התואמים – עלות התמותה ועלות אובדן התוצר (V_d ו- V_y) ומספר המתים הכולל (N_d) וגם מספר המתים בגלל פריצת המגבלת העומס המקסימלי \bar{X} של מערכת הבריאות. העלויות הן במונחים של ערך נוכחי וביחידות של תוצר שנתי.

לוח 5

המסקנה הראשונה, העולה מלוח 5 היא כי השימוש בסגר בשילוב עם אסטרטגיות יציאה מחזוריות מהווה שיפור מאוד משמעותי במונחים של פונקציית העלות של המתכנן בהשוואה לאסטרטגיית אי-התערבות או סגר מלא ממושך.

המסקנה השנייה היא שתוצאות ההתערבות האופטימלית תלויות באופן בלתי נפרד הן בסוג הכלים העומדים לרשותו של המתכנן והן במחירים היחסיים של אובדן תוצר אל מול אובדן חיים בפונקציית העלות שלו. למשל, כאשר המתכנן עובד עם אסטרטגיית $k = 4$ בעולם של מחיר חיים נמוך, מתקבל פתרון של

התערבות מאוחרת וקצרה יחסית המביאה לכמות גבוהה מאוד של מתים, לפריצה של מגבלות מערכת הבריאות, ויחד עם זאת לעלות תת ייצור נמוכה יחסית. לעומת זאת, בעולם של ערך חיים גבוה, המתכנן מנצל אותו הכלי ($k = 4$) לדיכוי יעיל וממושך מאוד של המגפה, מה שמביא את מספר המתים כמעט לאפס אבל כרוך בעלות בלתי מבוטלת של אובדן תוצר.

מהי הדינמיקה העולה מלוח 5?

המתכנן המרכזי נאלץ לבחור באחת משתי אסטרטגיות של מדיניות בריאות הציבור לטיפול במגפה.

(1) האסטרטגיה האחת מכוונת להשגת חיסון-עדר. השיקול כאן הוא שהעלות הכלכלית של אמצעי הסגר השונים, עד שיימצא חיסון, הינה יקרה מדי, ועל כן מתיר המתכנן למגפה להתפשט, תוך שהוא מתזמן את אמצעי הסגר כך שהתמותה תהיה קטנה ככל הניתן. הכלים הנתונים למתכנן להגבלת התמותה הינם לפזר את ההדבקות על פני זמן, כך שהיקף התחלואה יפרוץ את המגבלות של מערכת הבריאות רק במידה מוגבלת, ולצמצם את התופעה הקרויה תחלואת יתר (Over Shooting). תופעה זו פירושה היקף ההתפרצות כל כך גבוה, כך שהתחלואה עוברת את הסף בו מושג חיסון עדר. כאשר המחיר היחיד לחיי אדם, אותו רואה המתכנן, הינו הערך הכלכלי של החיים (שנדון לעיל), אסטרטגיה זו היא הבחירה המועדפת עליו. לכן הוא מתזמן את הסגרים כך שיהיו שני גלים, שניהם לא יחצו את מגבלות מערכת הבריאות במידה משמעותית, ותחלואת היתר מעבר לחסינות העדר גם היא תהיה מצומצמת. בלוח 5 ניתן לראות בחלק א' (לפי T_0) שבכל האסטרטגיות הנבחנות לא ממחר המתכנן להטיל סגר כללי ונותן למגפה להתפרץ ולהקטין את מאגר הרגישים ובכך להתקדם לחסינות עדר. הסגר המוטל אחר כך הינו קצר יחסית והוא מתזמן במטרה לא לתת לגל הראשון ליצור עומס בלתי נסבל על מערכת הבריאות. הסגר הקצר יחסית מוחלף באסטרטגיה מחזורית (ב- T_1). זו במקרים מסוימים מסתיימת מאוד מהר ואז מתפרצת המגפה שנית, לאחר השחרור, יש Overshooting מאוד גדול, ותמותה גבוהה מאוד, העולה על 4000 אנשים. במקרים אחרים, כאשר האסטרטגיה יותר זולה מבחינת אובדן התוצר, כמו, למשל, אסטרטגיה $k=8$ של סוף שבוע ארוך, נמשך החלק המחזורי כמעט שנה ומכיל גל שני מתון, הדועך בעצמו ומגיע לחסינות עדר "מקומית". לאחר השחרור שבה המגפה לגדול אבל המערכת כבר קרובה דיה לחסינות עדר כללית וגם החיסון מגיע מהר ולכן התפרצות שלישית של ממש אינה מתרחשת. בתסריט כזה התמותה היא כמעט פי שניים יותר נמוכה מאשר באסטרטגיה עם k יותר נמוך, כלומר מדיניות יותר מחמירה ולכן יותר יקרה מבחינת עלות אובדן התוצר. בתרשים 8 ניתן לראות את הדינמיקה באסטרטגיה מסוג זה, שהיא המיטבית מבין האפשריות למתכנן ($k=10$): המתנה לגל ראשון, סגר משמעותי וקצר, ואז סגר חלקי של סוף שבוע המאפשר התפרצות של הגל השני, הדועך מאליו עקב חסינות העדר.

תרשים 8

(2) האסטרטגיה השנייה הינה המתנה לחיסון. כלומר, המתכנן מעריך את חיי האדם במידה כזו שהוא מוכן לשלם מחירים גבוהים יותר כדי לצמצם את התחלואה. תסריט זה מתממש כאשר ערך החיים העומד בפני המתכנן הינו גבוה יחסית. תוצאות מסוג זה מוצגות בלוח 5 ב'. ניתן לראות שבהינתן ערך חיים גבוה משתמש המתכנן באסטרטגיות יעילות עם מעט ימי עבודה לדיכוי יעיל וממושך של המחלה עד להמצאת החיסון. המתכנן מתחיל עם סגר מיידי וברגע שעבר מספיק זמן להורדת קצב ההדבקה הוא מחליף את הסגר באסטרטגיה המחזורית, המחזיקה את המגפה תחת שליטה. באסטרטגיות הפחות יעילות כמו למשל $k=8$, המתכנן יודע שלא יצליח לשלוט במחלה באופן מוחלט ולכן הוא בוחר לתת למחלה להתפרץ בהתחלה כדי להקטין את מלאי הרגישים, ועושה סגר ארוך יותר המוחלף בחלק המחזורי. חלק זה נמשך עד לחיסון, ובו מתפתח גל שני מתון מאוד כך שסה"כ המחלה נשארת מאוד רחוקה מחסינות עדר כללית במועד המצאת החיסון. בתרשים 9 ניתן לראות את הדינמיקה באסטרטגיה המיטבית האפשרית למתכנן ($k=8$): המתכנן מבצע סגר ארוך יחסית, המאפשר לאוכלוסייה לשנות את הרגלי החיים שלה וגם משאיר יחסית פחות זמן לחלק המחזורי, שהוא כלי חלש יותר מבחינת צמצום התמותה. עלותה של זו מאוד גבוהה במקרה הזה. לאחר הסגר, נוקט המתכנן באסטרטגיה מחזורית, במטרה להגביל את היקף התחלואה עד להימצאות חיסון. כאשר בוחר המתכנן באסטרטגיה זו פועל המשק במשך תקופה ארוכה במסלול של סוף שבוע ארוך המספיק לצורך שמירה על היקף תחלואה מוגבל עד להגעה הצפויה של החיסון.

תרשים 9

תרשימים 10 ו-11 מראים את הדינמיקה של מספר הנשאים החדשים ומספר המתים בפועל אל מול הדינמיקה שהייתה מתקבלת במודל עם מתכנן מרכזי.¹⁴ אנו משווים בין שלושה תסריטים: הנתונים בפועל, המדיניות המיטבית של מתכנן עם ערך חיים נמוך של $k=10$, והמדיניות המיטבית של מתכנן עם ערך חיים גבוה של $k=8$.

תרשימים 10 ו-11

אנו רואים שהתחלואה בפועל מהווה מקרה ביניים ביחס לשני ניסוחי המודל. בגל הראשון, לא נקטה ישראל מדיניות של סגר כללי מידי וממושך כמו שמקבל ההחלטות במודל היה עושה, בהינתן ערך חיים גבוה. בגל הראשון הגיע הסגר הכללי אמנם מהר, אבל רק לאחר התפרצות מסוימת. יחד עם זאת, ישראל גם לא חיכתה

¹⁴ לצורך השוואה למציאות, החולים החדשים במודל מחושבים לפי $E \cdot \sigma$. האינטואיציה היא שמערך הבדיקות מזהה את הנשאים ולא את החשופים.

יותר מדי זמן עם הסגר הראשון ולא נתנה למחלה להתפרץ במידה רחבה, כזו המתקבלת במקרה של מתכנן עם ערך חיים נמוך (כפי שמראה הקו האדום).

שנית, לאחר ההשתלטות על הגל הראשון, מאפשר המודל רק דפוס אחד של מדיניות, דהיינו אסטרטגיה מחזורית ואחר כך שחרור מלא. הפתרונות האופטימליים במודל הם להמשיך עם אסטרטגיה מחזורית עד הגעת החיסון. בערך חיים נמוך נשאר המגפה ברמה מאוד גבוהה, עם גל שני מתון יחסית לגל הראשון, ועם תנודות הנובעות מהמבנה המחזורי של האסטרטגיה. בערך חיים גבוה, אמנם גם בחלק המחזורי מתפתח גל שני אבל קצב העלייה הוא איטי וההיקף נשאר נמוך מאוד. במציאות, שחררה ישראל את המשק באופן מהיר ונרחב אחרי הסגר הראשון, מה שייצר בסופו של דבר את הגל השני, שעקף בממדיו את הגל הראשון. או אז ננקטו צעדים מרסנים כדי להשתלט עליו. במציאות, הגל השני היה עדיין קטן יותר מפי-2 מהגל השני במודל עם ערך חיים נמוך, והוא היה כמובן גבוה בהרבה מהגל השני (הכמעט בלתי נראה) במודל עם ערך חיים גבוה.

כיצד ניתן לפרש את הדינמיקה הזו, של ישראל בפועל, לעומת האסטרטגיות האופטימליות? ההשוואה אינה מובנת מאליה, משום שבעוד שהמתכנן במודל מוגבל בעוצמת הכלים העומדים לרשותו ובמספר השינויים האפשריים לאורך זמן, הרי שהמדיניות בפועל התאפיינה בשינויים רבים ובהפעלת כלים בעוצמות משתנות. עם זאת ניתן לערוך את ההשוואה הבאה. במחצית ספטמבר היה מספר המתים בפועל כ-1,200 וירידת התוצר כ-10% (נתוני הלמ"ס למחצית ספטמבר מלמדים על ירידה של 10.2% במחצית הראשונה של השנה לעומת קודמתה בחישוב שנתי¹⁵), בעוד שבמודל האפשרויות המיטביות שצוינו לעיל מביאות בטווח זמן שכזה לירידה בתוצר ולמספר המתים המצטבר כדלקמן:

(א) כ-22 אלף מתים וירידת תוצר של כ-3% (ערך מהוון במונחים שנתיים) במצב של ערך חיים נמוך יחסית ($\chi_1 = 36, \chi_2 = 0$). הרקע לתוצאות אלו הוא שבאסטרטגיה זו הסגר הראשוני הוא קצר יחסית והמעבר ממנו הוא לאסטרטגיה מחזורית, המשאירה את המשק פתוח רוב הזמן.

(ב) כ-3 מתים ו כ-10% ירידת תוצר במצב של ערך חיים גבוה יחסית ($\chi_1 = 36, \chi_2 = 64$). הרקע לתוצאות אלו הוא שבאסטרטגיה זו הסגר הראשוני, המלא, מתחיל מיד ונמשך כמעט שלושה חודשים. זהו סגר ארוך מאד המיועד להכחדה כמעט מוחלטת של המגפה. הדינמיקה בו דומה למה שנעשה ביפן (אם כי בכלים אחרים ולא באמצעות סגר ארוך, ראו הדיון בסעיף 2 לעיל).

¹⁵ ראו

<https://www.cbs.gov.il/he/mediarelease/pages/2020/%D7%97%D7%A9%D7%91%D7%95%D7%A0%D7%95%D7%AA-%D7%9C%D7%90%D7%95%D7%9E%D7%99%D7%99%D7%9D-%D7%90%D7%95%D7%9E%D7%93%D7%9F-%D7%A9%D7%A0%D7%99-%D7%9C%D7%A8%D7%91%D7%A2-%D7%A9%D7%A0%D7%99-2020.aspx>

נדגיש כי הפתרון האופטימלי מחייב שלאחר הסגר ישתמש המתכנן באסטרטגיית יציאה לזמן ארוך. אסטרטגיית היציאה מהווה נדבך חיוני בניהול המגפה, בלעדית מתפרצת המגפה שוב תוך זמן קצר אחרי הסרת הסגר הראשוני.¹⁶

מכאן עולה שישראל הייתה רחוקה מאד מאסטרטגיה המייחסת ערך נמוך יחסית לחיים, הן במימד של אובדן התוצר, שבפועל היה גבוה הרבה יותר, והן במימד התמותה, שבפועל הייתה הרבה יותר נמוכה (השוואה היא לסעיף א' דלעיל).

אך ישראל הייתה גם רחוקה מאסטרטגיה המייחסת לחיים ערך גבוה (סעיף ב' דלעיל), שכן הגיעה לתמותה גדולה בהרבה מזו האופטימלית, עם אובדן תוצר דומה. התמותה בפועל, שהייתה גבוהה יותר מהמתקבל במודל, הייתה ככל הנראה תוצאה של סגר קצר יותר ומאוחר יותר, ובשל העדרה של אסטרטגיית יציאה מסודרת, המסוגלת לשלוט בהיקף המגפה. יתכן שהעלות הכלכלית בפועל דמתה לזו המתקבלת במודל, על אף הסגר הקצר יחסית שהופעל במציאות, כיון שהעלויות הכלכליות במציאות כוללות לא רק את התוצר שאבד בתקופת הסגר, אלא גם אובדן תוצר עקב השלכות משנה של המגפה והסגר, כגון פשיטות רגל של עסקים, קיפאון בביקושים, והתאוששות איטית בשוק העבודה.

¹⁶ ללא אסטרטגיית יציאה כזו, כלומר, אם בסוף אותו הסגר הארוך יש שחרור מוחלט, תתפרץ המגפה וכבר ביום ה-250 מנבא המודל שיהיו כ-1500 מתים, לעומת כ-5 מתים בפתרון האופטימלי.

8. סיכום

הדינמיקה של המגפה בישראל מסתכמת בשבעת החודשים הראשונים שלה בשנת 2020 בגל ראשון, שדוכא מהר על ידי סגר כללי בחודשים מרץ-אפריל, ובגל שני שהחל ביוני והתעצם בספטמבר. המודל האפידמיולוגי שהוצג במאמר תופס טוב יחסית דינמיקה זו. הניתוח מעלה שני תוואים למדיניות בריאות הציבור בראייה של מינימיזציה של הפסדים בתחום בריאות הציבור ובתחום אובדן תוצר ותעסוקה. האחד מכוון להשגת חסינות עדר והשני מכוון להמתנה לחיסון. בחינה של המדיניות בפועל בפרספקטיבה זו מביאה למסקנה שאף שהמדיניות המוצהרת הייתה של המתנה לחיסון, הרי שהיעדר מדיניות יציאה סדורה מהגל הראשון, הביא לגל שני שתוצאותיו קשות מאלה של הגל הראשון ולסגר שני שאת מחירו הכלכלי מוקדם להעריך. ככל שהסגר השני יצליח לצמצם משמעותית את היקף המגפה, העתיד תלוי ביכולת לבנות ולקיים אסטרטגיית יציאה בת קיימא, הנושאת עמה מחיר כלכלי, שתשמור על המגפה בממדים נמוכים עד הימצאותו של חיסון.

שמואלי עמיר ואסתי ניסן-אנגלצ'ין, 2008. "אמזן ראשוני של ערך חיי אדם בישראל והשלכותיו לגבי עדכון סל השירותים של ביטוח הבריאות הממלכתי," **הרבעון לכלכלה** 55, 4, 467-487.

Alon, Uri , Tanya Baron, Yinon Bar-On, Ofer Cornfeld, Ron Milo, and Eran Yashiv, 2020. " Managing Covid19 Using Cyclical Strategies: Health and Economic Implications," working paper, available at <https://www.tau.ac.il/~yashiv/LSE%20June%20paper.pdf>

Bar-On, Yinon, Tanya Baron, Ofer Cornfeld, Ron Milo and Eran Yashiv, 2020. "Caveats for Economists: Epidemiology-Based Modelling of COVID 19 and Model Misspecifications" CEPR Discussion Paper 15107.

Bar-On, Yinon, Ron Sender, Avi Flamholz, Rob Phillips, and Ron Milo, 2020. "A Quantitative Compendium of COVID-19 Epidemiology," arXiv:2006.01283; available at <https://arxiv.org/abs/2006.01283>

Hall, Robert E, Charles I. Jones, and Peter J. Klenow, 2020. "Trading Off Consumption and COVID-19 Deaths," **Minneapolis Fed Quarterly Review** 42, 1, 2-14.

Kaplan, Greg, Ben Moll, and Gianluca Violante, 2020. "The Great Lockdown: Macroeconomic and Distributional Effects of Covid-19," Manuscript, University of Chicago.

Karin, Omer, Yinon Bar-On, Tomer Milo, Itay Katzir, Avi Mayo, Yael Korem, Avichai Tendler, Boaz Dudovich, Eran Yashiv, Amos J Zehavi, Nadav Davidovitch, Ron Milo and Uri Alon, 2020. "Adaptive cyclic exit strategies from lockdown to suppress COVID-19 and allow economic activity", MedRxiv, available at <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.04.20053579v4.full.pdf>

Jones, Charles I. and Jesus Fernandez-Villaverde, 2020. "Estimating and Simulating a SIRD Model of COVID-19 for Many Countries, States, and Cities," NBER Working Paper No. 27128.

Kermack, William O., and Anderson G. McKendrick, 1927. "A Contribution to the Mathematical Theory of Epidemics," *Proceedings of the Royal Society London. Ser. A.*, 115, 700--721.

Viscusi, W. Kip and Clayton J. Masterman, 2017. "Income Elasticities and Global Values of a Statistical Life," **Journal of Benefit Cost Analysis** 8(2):226–250

המודל ביסוד המשוואות לאמידה

האמידה נעשית על סמך השיטה המוצגת ב-Jones and Villaverde (2020). המשוואות המשמשות לאמידה הן כדלקמן.

א. אמידה על סמך נתוני מתים

$$\Delta S(t+1) = -\beta(t)I(t)S(t)/N \quad (1)$$

$$\Delta E(t+1) = \beta(t)I(t)S(t)/N - \sigma E(t) \quad (2)$$

$$\Delta I(t+1) = \sigma E(t) - \gamma I(t) \quad (3)$$

$$\Delta R(t+1) = \gamma I(t) - \theta R(t) \quad (4)$$

$$\Delta D(t+1) = \mu \theta R(t) \quad (5)$$

$$\Delta C(t+1) = (1 - \mu)\theta R(t) \quad (6)$$

ממשוואה (5) משתמע:

$$R(t) = \frac{\Delta D(t+1)}{\mu\theta} = \frac{d(t+1)}{\mu\theta}$$

$$\Delta R(t+1) - R(t+1) - R(t) = \frac{d(t+2)}{\mu\theta} - \frac{d(t+1)}{\mu\theta} = \frac{\Delta d(t+2)}{\mu\theta}$$

ממשוואה (4) משתמע:

$$I(t) = \frac{\Delta R(t+1) + \theta R(t)}{\gamma} = \frac{1}{\mu\gamma} \cdot \left(\frac{\Delta d(t+2)}{\theta} + d(t+1) \right)$$

$$\Delta I(t+1) = I(t+1) - I(t) = \frac{1}{\mu\gamma} \cdot \frac{\Delta \Delta d(t+3)}{\theta} + \Delta d(t+2)$$

$$\Delta I(t+2) = I(t+2) - I(t+1) = \frac{1}{\mu\gamma} \cdot \frac{\Delta \Delta d(t+4)}{\theta} + \Delta d(t+3)$$

על סמך משוואה (3):

$$E(t) = \frac{\Delta I(t+1) + \gamma I(t)}{\sigma}$$

$$\Delta E(t+1) = E(t+1) - E(t) = \frac{\Delta I(t+2) - (1-\gamma)\Delta I(t+1)}{\sigma}$$

ממשוואה (2):

$$\Delta E(t+1) = \beta(t) \cdot I(t) \cdot S(t)/N - \sigma E(t)$$

$$\frac{\Delta I(t+2) - (1-\gamma)\Delta I(t+1)}{\sigma} = \beta(t) \cdot I(t) \cdot S(t)/N - \Delta I(t+1) - \gamma I(t)$$

נחלקם ב I:

$$\frac{\Delta I(t+2)/I(t) - (1-\gamma)\Delta I(t+1)/I(t)}{\sigma} = \beta(t) \cdot S(t)/N - \Delta I(t+1)/I(t) - \gamma$$

נסדר מחדש:

(7)

$$\beta(t) = \frac{N}{S(t)} \cdot \left(\frac{\Delta I(t+2)/I(t)}{\sigma} + \left(1 - \frac{1-\gamma}{\sigma}\right) \Delta I(t+1)/I(t) + \gamma \right)$$

נציב:

(8)

$$\beta(t) = \frac{N}{S(t)} \cdot \left(\frac{1}{\sigma} \cdot \frac{\frac{\Delta \Delta d(t+4) + \Delta d(t+3)}{\sigma} + \Delta d(t+3)}{\frac{\Delta d(t+2)}{\theta} + d(t+1)} + \left(1 - \frac{1-\gamma}{\sigma}\right) \cdot \frac{\frac{\Delta \Delta d(t+3) + \Delta d(t+2)}{\sigma} + \Delta d(t+2)}{\frac{\Delta d(t+2)}{\theta} + d(t+1)} + \gamma \right)$$

ניתן ביטוי ל-S(t) ממשוואה (1)

(9)

$$S(t+1) = S(t) \cdot \left(1 - \beta(t) \cdot \frac{1}{\mu \gamma N} \cdot \left(\frac{\Delta d(t+2)}{\theta} + d(t+1) \right) \right)$$

בהינתן סדרה יומית של מתים, פותחים את משוואות (7) ו-(8) לעיל עבור $\beta(t)$ ו- $S(t)$.

ב. אמידה על סמך נתוני נשאים

על סמך משוואות (1) ו-(7) :

(10)

$$\beta(t) = \frac{N}{S(t)} \cdot \left(\frac{\Delta I(t+2)/I(t)}{\sigma} + \left(1 - \frac{1-\gamma}{\sigma}\right) \Delta I(t+1)/I(t) + \gamma \right)$$

$$\Delta S(t+1) = -\beta(t) \cdot I(t) \cdot S(t)/N$$

$$S(t+1) = S(t) \cdot (1 - \beta(t) \cdot I(t)/N)$$

לוח 1

אמצעי מדיניות בריאות הציבור

פברואר-אוגוסט 2020

<u>תאריך</u>	<u>החלטות עיקריות</u>	<u>החלטות משניות</u>
<u>פברואר</u>		
2		קריאה לחוזרים מסין להישאר בבית
3	חובת בידוד של 14 יום לחוזרים מסין	
16	חובת בידוד לחוזרים מתאילנד, הונג קונג, סינגפור ומקאו	
27	חובת בידוד לחוזרים מאיטליה	
		<u>מרץ</u>
2	הבחירות לכנסת	
4	חובת בידוד לחוזרים מצרפת, ספרד, גרמניה, אוסטריה ושוויץ. איסור על התכנסות של למעלה מ-5,000 איש	המלצה לאוכלוסייה בסיכון להישאר בבית. איסור על כנסים בינלאומיים
9	ערב פורים. חובת בידוד לכל השבים מחו"ל. התרת כניסה לזרים רק אם יש ביכולתם לשהות בבידוד	קריאה לתיירים לעזוב
11	הגבלת התקהלות ל-100 איש. אירועי ספורט ללא קהל	
13	סגירת בתי הספר והאוניברסיטאות	
14	הגבלת התקהלות לעד 10 אנשים	

	סגירת גני הילדים	15
	צמצום מספר העובדים במגזר הפרטי ל-30%. המגזר הציבורי עובר למתכונת חירום	16
	השבתת פעילות מסחר, בילוי ופנאי. יציאה מהבית מותרת לצורך חיוני בלבד	19
	הגבלת יציאה מהבית עד 100 מטר או לצורך חיוני. סגירת חנויות שאינן חיוניות. צמצום התחבורה הציבורית. סגירת בתי הכנסת. ללא שהייה במרחב הציבורי	25
	<u>אפריל</u>	
	ליל הסדר (הגבלות ספציפיות למשך החג)	8
	חובת עטיית מסיכה	12
	ערב חג שני של פסח (הגבלות ספציפיות)	14
	הקלה ראשונה בסגר – פתיחת בתי עסק מסוימים בכפוף להגבלות, הגדלת כמות העובדים במקומות מאושרים (בהתאם ל"יתו הסגול") והקלות נוספות	19
	הקלה נוספת בסגר – פתיחת בתי עסק נוספים	26
	יום הזיכרון/ערב יום העצמאות (הגבלות ספציפיות)	28
	<u>מאי</u>	
	פתיחת כיתות א'-ג', י"א-י"ב. הגדלת היקף העבודה במגזר הציבורי (בהתאם ל"יתו הסגול")	3
	ביטול מגבלת היציאה מהבית עד 100 מטר. התרת פעילות ופתיחת עסקים נוספים	4
	פתיחת הקניונים, השווקים וחדרי הכושר	7

	10	פתיחת פעוטונים וגני ילדים. התרת התקהלות במקום פתוח עד 50 איש
ערב ל"ג בעומר (הגבלות ספציפיות). התרת שהייה בגנים ובפארקים ציבוריים	11	
	17	פתיחת כיתות ד"י (בכפוף להחלטת הרשות המקומית)
	20	פתיחת בתי התפילה וחופי הרחצה
	27	פתיחת מסעדות, ברים, מועדונים, בריכות, מלונות, חוגים, תנועות נוער וחינוך בלתי פורמלי. הקלות במקומות העבודה
	28	ערב שבועות. הקלת המגבלות בתחבורה הציבורית
	31	פתיחת כלל בתי הספר לפעילות מלאה. הקלה במגבלות על ההשכלה הגבוהה (אפשר שיעורים פרונטליים ומבחנים תחת המגבלות)
		<u>יוני</u>
	14	פתיחת אולמות האירועים ואירועי תרבות (תחת מגבלות – 250 איש)
	20	סיום לימודים בחטיבות הביניים והתיכונים
	22	חזרת הרכבות לפעילות
	29	החמרת המגבלות במופעי תרבות, אירועים ותפילות. מעבר למבחנים מקוונים בהשכלה הגבוהה. 30% עבודה מהבית במגזר הציבורי
	30	סיום לימודים בבתי הספר היסודיים ובגנים
		<u>יולי</u>
	1	פתיחת "בית הספר של החופש הגדול" עבור ילדי הגנים וכיתות א"ד

	הגבלות התקהלות עד 20 איש במקומות סגורים (עד 50 איש באולמות, ברים, מועדונים ובתי תפילה)	2
	סגירת אולמות, מועדונים וברים. הגבלות נוספות על אירועי תרבות, תיירות, בתי תפילה ותחבורה ציבורית	6
סגירת חדרי כושר	הגבלת פעילות בסופי השבוע (לרבות סגירת קניונים, שווקים, חנויות ואטרקציות תיירותיות). צמצום פעילות משרדי הממשלה	17
	פתיחת אטרקציות תיירות בסופי השבוע	23
פתיחת חדרי כושר		26
	ערב ט' באב (מגבלות ספציפיות)	29
		אוגוסט
	ביטול מגבלות הפעילות בסופי השבוע. סיום "בית הספר של החופש הגדול" עבור ילדי הגנים וכיתות א'-ד'	6
	איסור התקהלות של יותר מ-20 אנשים בשטח פתוח, ועד 10 אנשים במבנה, עם אישור חריגה למסעדות, בתי עסק שאינם מקבלים קהל ועוד	9
	אישור מופעי תרבות בחוץ	11
	הרחבת אישור התקהלות לעד 30 איש בשטח פתוח, ועד 10 או 20 איש במקום סגור (בהתאם לגודל)	14
	ביטול חובת הבידוד לנכנסים לישראל ממדינות שהוגדרו "ירוקות" (21 מדינות בשלב זה, אך לא כולן מאפשרות כניסת ישראלים). בשלב זה ניתן לצאת לבולגריה, קרואטיה ויוון ללא חובת בידוד בהלוך ובחזור	16

מקורות ראשיים:

<https://www.gov.il/he/departments/topics/corona-main-sub>

<https://www.haaretz.co.il>

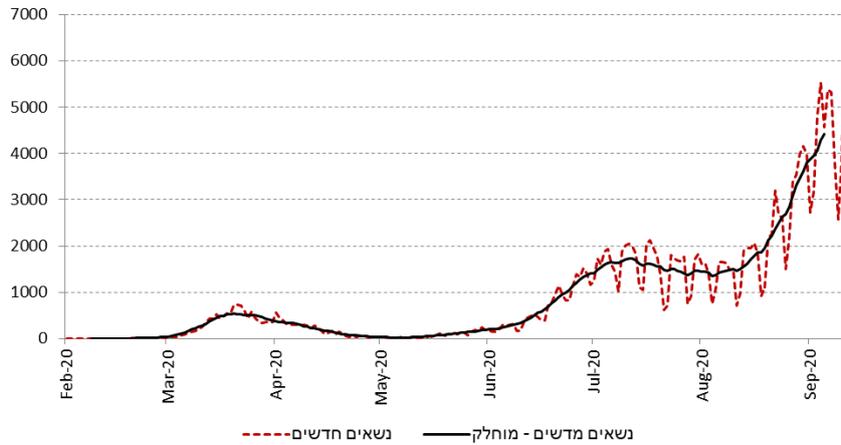
<https://www.themarker.com>

<https://www.ynet.co.il>

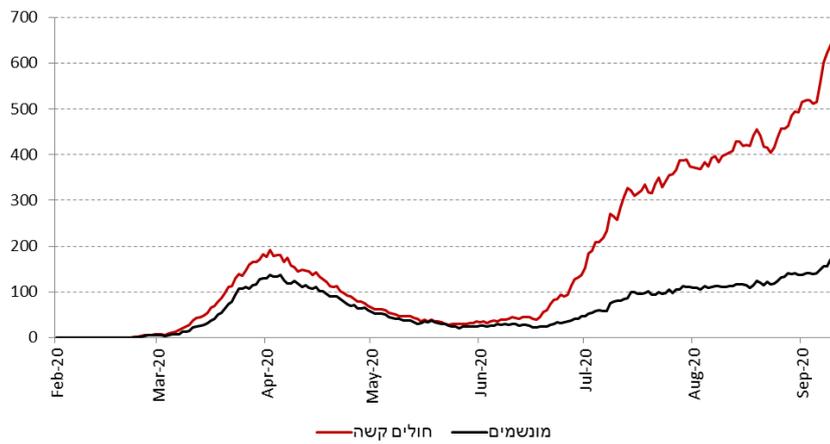
תרשים 1

נתוני המגפה בישראל

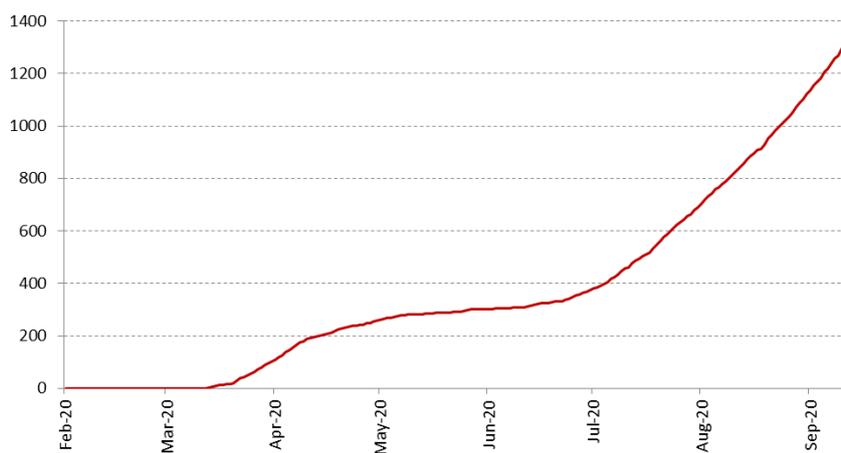
נשאים חדשים



חולים קשה ומונשמים



מתים

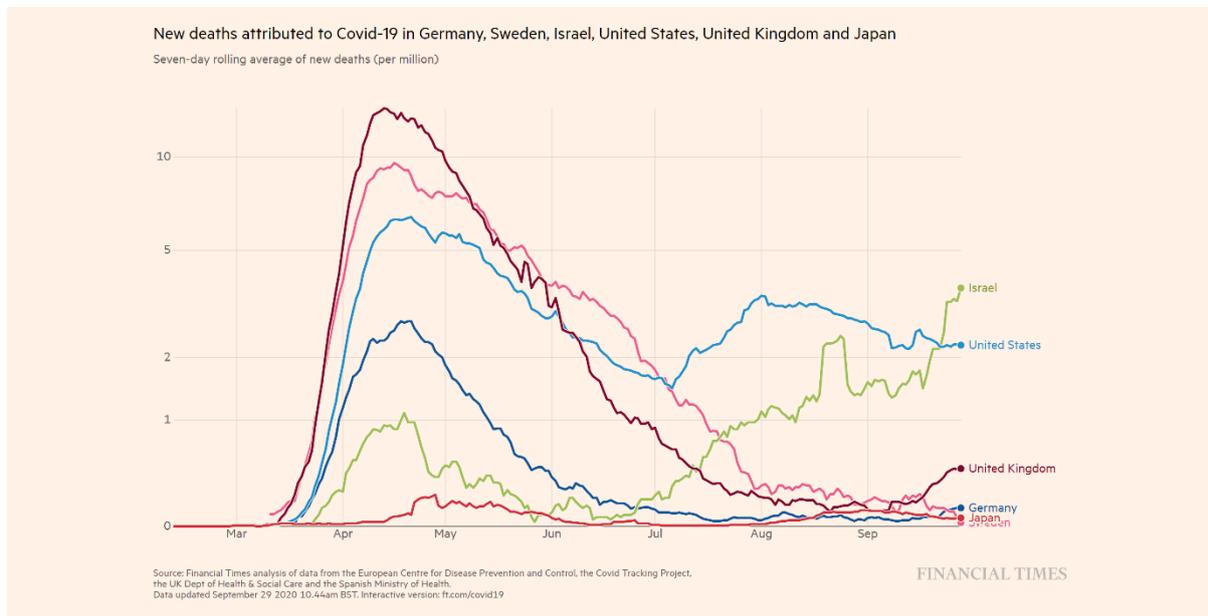


<https://datadashboardapi.health.gov.il/api/queries/infectedPerDate> מקור: נדבקים

<https://datadashboardapi.health.gov.il/api/queries/patientsPerDate>: חולים ומתים

תרשים 3

נתוני המתים (זרם) במספר מדינות



מקור:

מתוך אתר Financial Times , נתונים ל-29 בספטמבר 2020.

<https://ig.ft.com/coronavirus-chart/?areas=deu&areas=swe&areas=ISR&areas=usa&areas=gbr&areas=jpn&areasRegional=usny&areasRegional=usca&areasRegional=usfl&areasRegional=ustx&areasRegional=usny&areasRegional=usca&byDate=1&cumulative=0&logScale=1&perMillion=1&values=deaths>

לוח 2

החלטות מדיניות כלכלית

פברואר-אוגוסט 2020

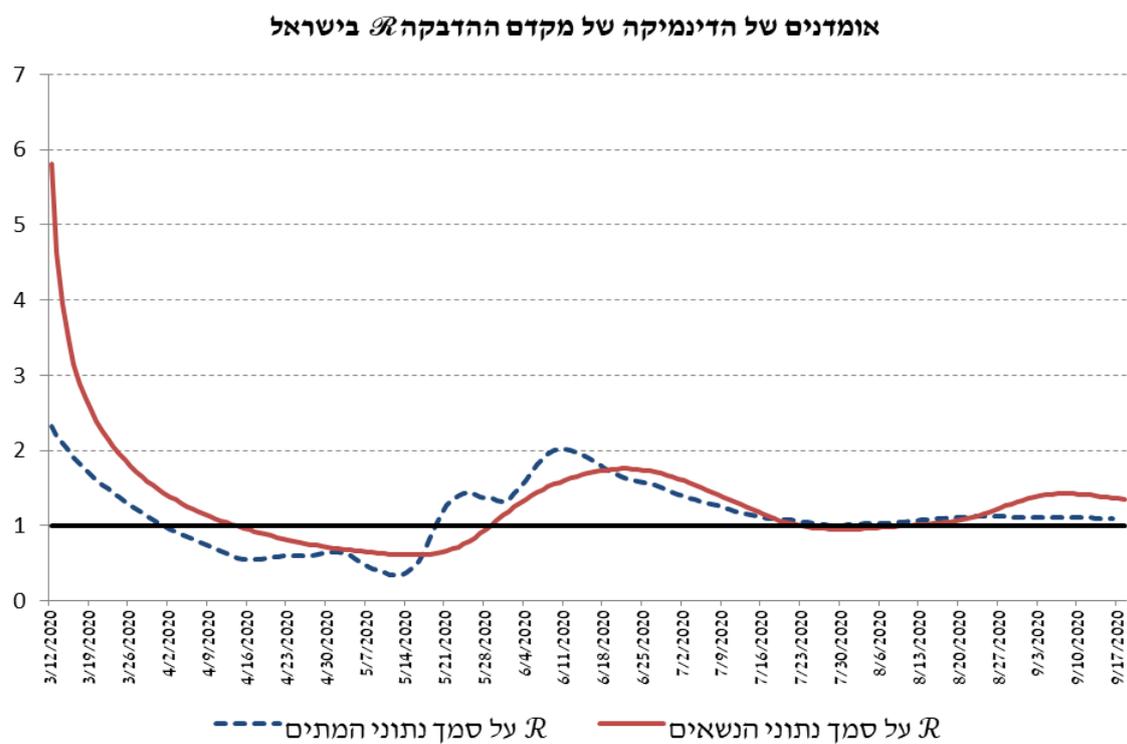
<u>מקור</u>	<u>החלטה</u>	<u>תאריך</u>
החלטות פיסקליות		
<p>GOLDMAN SACHS, CEEMEA: COVID-19 & Policy Response Update (August 25)</p> <p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_30032020_b</p> <p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_08052020_b</p>	<p>חבילת סיוע בסך 100 מיליארד שקלים ; 41 מיליארד למגזר העסקי ; 21 מיליארד לרשת ביטחון סוציאלית ; 11 מיליארד לבריאות ; 7 מיליארד למנועי צמיחה ; 14 מיליארד להלוואות לעסקים קטנים ובינוניים ; 6 מיליארד לתמריצי תעסוקה</p>	מתמשך
<p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_08032020</p> <p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_04052020</p>	<p>קרן להעמדת הלוואות לעסקים קטנים ובינוניים בערבות המדינה (הקרן גדלה עד כדי 14 מיליארד ב-4.5)</p>	8.3
<p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_16032020_b</p>	<p>חבילת צעדים לסיוע למשק ובהם דחיית תשלומי חובה לעצמאים ולעסקים קטנים ובינוניים, מענק סיוע מיוחד לעצמאים, מענק מיוחד למפוטרים, הקלות במתן הלוואות והגדלת מסגרת אשראי ועוד</p>	16.3
<p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_07042020_d</p>	<p>הנחה של 25% בארנונה לעסקים (2.8 מיליארד שקל)</p>	7.4
<p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_07042020_i</p>	<p>קרן הלוואות בערבות המדינה לעסקים גדולים בהיקף של 6 מיליארד שקל</p>	7.4
<p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_24042020</p>	<p>סיוע לעצמאים ועסקים קטנים בסך של 8 מיליארד שקל</p>	24.4
<p>https://www.gov.il/he/departments/news/press_27042020</p>	<p>6 מיליארד ש"ח לשימור והחזרת עובדים למעגל התעסוקה</p>	26.4

https://www.gov.il/he/departments/news/press_07062020_b	ביטול קבוע של המכסים ומיסי הקניה על שורה רחבה של מוצרים בהיקף 1.45 מיליארד שקלים בשנה	7.6
https://www.gov.il/he/departments/news/press_29062020	תוכנית סיוע למגזר העצמאים והמגזר העסקי בהיקף 2 מיליארד שקלים	29.6
GOLDMAN SACHS, CEEMEA: COVID-19 & Policy Response Update (August 25) https://www.gov.il/he/departments/news/press_28072020	"רשת ביטחון כלכלית 2020-21" בסך 80 מיליארד שקלים : (50 מיליארד בהוצאה ישירה ו-30 מיליארד בהלוואות)	28.7
https://www.gov.il/he/departments/news/press_29072020	כל תושב מעל גיל 18 זכאי למענק בגובה 750 שקל, ומענק נוסף של 500 שקל בעבור כל ילד עד לילד הרביעי במשפחה. החל מהילד החמישי יתקבל מענק בגובה 300 שקל לכל ילד נוסף	29.7
<u>החלטות מוניטריות</u>		
GOLDMAN SACHS, CEEMEA: COVID-19 & Policy Response Update (August 25) https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/22-3-20a.aspx	בנק ישראל ירכוש אג"ח ממשלתי בהיקף של 50 מיליארד שקל (בפועל נרכשו בהיקף של 23.9 מיליארד עד סוף יולי)	23.3
GOLDMAN SACHS, CEEMEA: COVID-19 & Policy Response Update (August 25) https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/29-3-2020a12.aspx	הפחתת דרישות ההון הרגולטורית מן הבנקים בנקודת אחוז אחת (מ-10% ל-9% בבנקים הגדולים, ומ-9% ל-8% בבנקים הבינוניים והקטנים)	29.3
GOLDMAN SACHS, CEEMEA: COVID-19 & Policy Response Update (August 25) https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/29-3-2020a12.aspx	הלוואות ל-3 שנים לבנקים בשיעור קבוע של 0.1% מותנה בהלוואה לעסקים קטנים (ללא מגבלה החל מה-6.7 – ראו קישור אחרון)	6.4

s/Pages/6-4-2020.aspx https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/6-7-2020.aspx		
https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/6-4-2020a.aspx	הפחתת הריבית מ-0.25% ל-0.1%	6.4
<p>GOLDMAN SACHS, CEEMEA: COVID-19 & Policy Response Update (August 25)</p> https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/7-5-2020b.aspx https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/13-7-20C.aspx	מתווה לדחיית תשלומי הלוואות (הרחבה ב-13.7 – ראו קישור אחרון)	7.5
		יוני-יולי
https://www.boi.org.il/he/NewsAndPublications/PressReleases/Pages/6-7-2020.aspx	בנק ישראל ירכוש אג"ח קונצרני בהיקף של 15 מיליארד שקל (בפועל נרכשו בהיקף של 0.6 מיליארד עד סוף יולי)	6.7

תרשים 4

ממצאי האמידה



לוח 3

כיוול המודל

א. החטיבה האפידמיולוגית

פרמטר	פירוש	ערך
$1/\sigma$	משך תקופת החביון	3
$1/\gamma$	משך תקופת ההדבקות	4

ב. החטיבה הקלינית

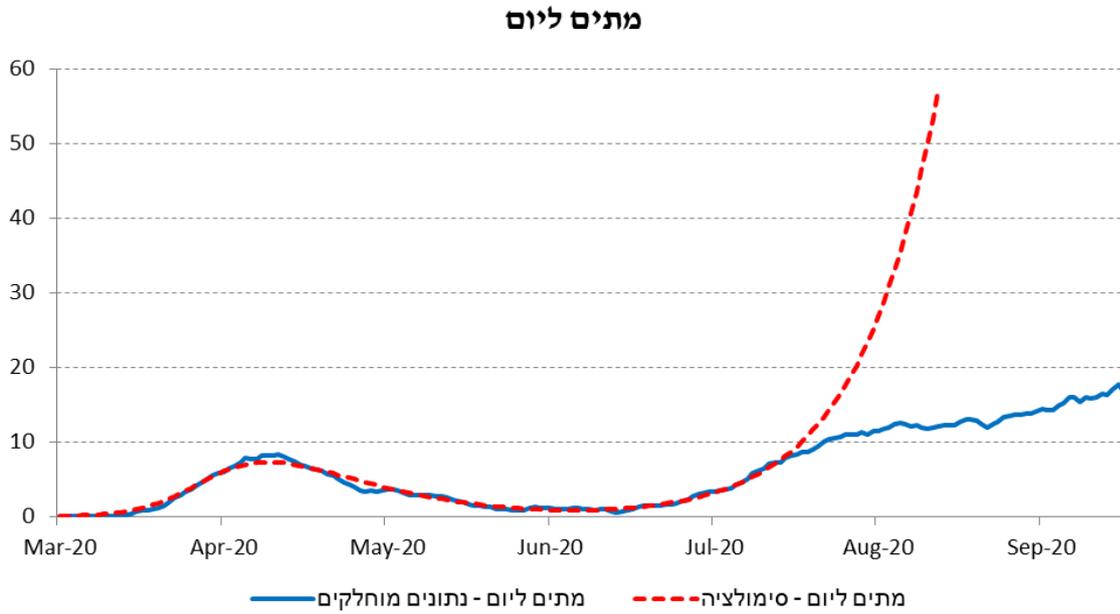
פרמטר	פירוש	ערך
$1/\theta_P$	משך תקופת האינקובציה	5
$1/\theta_M$	משך הזמן בין הופעת הסימפטומים לבין אישפוז	7
$1/\theta_H$	משך הזמן בין אישפוז לבין קבלה למח' לטיפול נמרץ	2
$1/\theta_X$	משך השהות במח' לטיפול נמרץ עד לפטירה	5.5
η	הסתברות להיות א-סימפטומטי	50%
ξ	הסתברות של חולה סימפטומטי להיות מאושפז	8%
π	הסתברות של חולה מאושפז להתקבל למח' לטיפול נמרץ	40%

ג. פרמטרים ייחודיים לישראל

פרמטר	פירוש	ערך
\bar{X}	מספר מיטות פנויות במח' לטיפול נמרץ	1000
χ_1	ערך החיים הסטטיסטי של נפטר ממוצע מקורונה בהתבסס על שיקולים כלכליים בלבד	36
χ_2	תוספת ערך חיים של נפטר ממוצע מקורונה בהתבסס על שיקולים לא-כלכליים	64
ρ	שיעור העובדים בהינתן המגבלות	0.65

תרשים 5

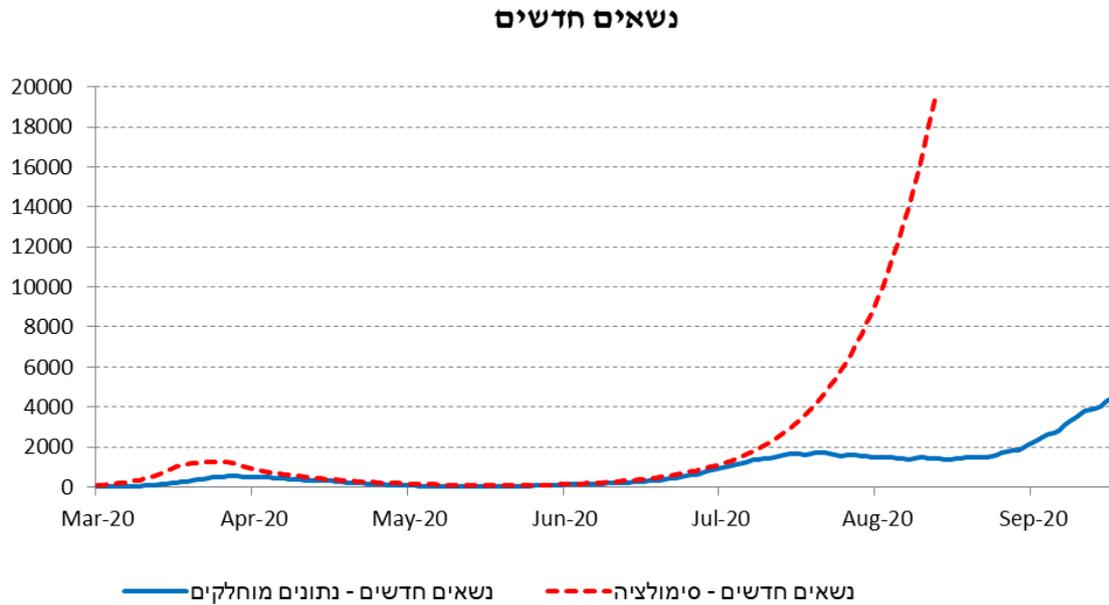
מספר המתים ליום: נתונים והסימולציה



הערה: ניתן לראות כי בסימולציה התפשטות המגפה מאיצה לאחר הסרת הסגר וגדלה באופן מעריכי. על מנת לשמור על בהירות הגרף איננו מציגים את סדרת הסימולציה בתקופות המאוחרות יותר, כיוון שהערכים שם גבוהים מדי להצגה באותה הסקלה.

תרשים 6

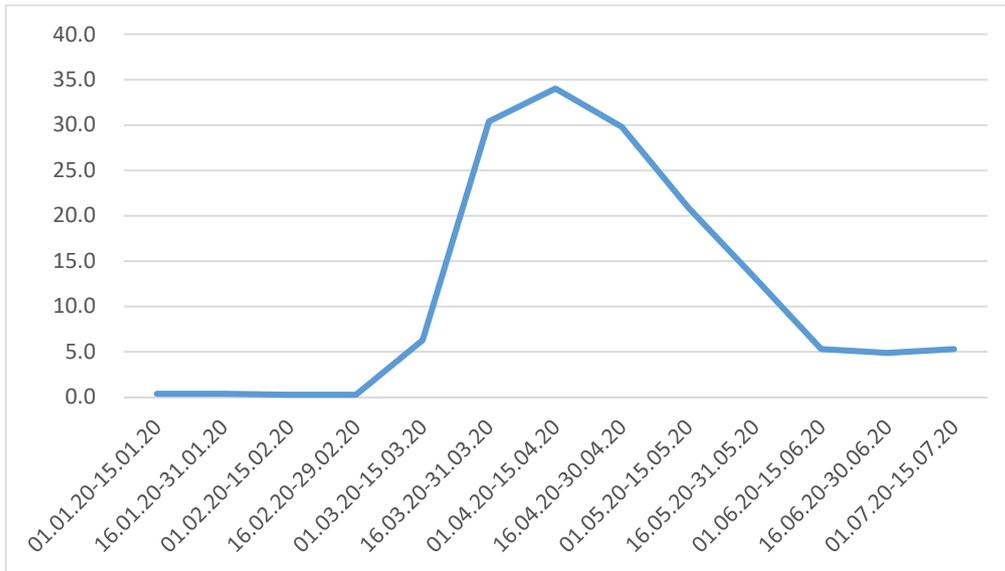
נשאים חדשים ליום: נתונים והסימולציה



הערה: ניתן לראות כי בסימולציה התפשטות המגפה מאיצה לאחר הסרת הסגר וגדלה באופן מעריכי. על מנת לשמור על בהירות הגרף איננו מציגים את סדרת הסימולציה בתקופות המאוחרות יותר, כיוון שהערכים שם גבוהים מדי להצגה באותה הסקלה.

תרשים 7

אחוז הנעדרים זמנית מעבודה מתוך המשתתפים בכוח העבודה בשל הקורונה



מקור: למ"ס, סקר כוח אדם. 17.

לוח 4

אסטרטגיות מחזוריות

ש'	ו'	ה'	ד'	ג'	ב'	א'	ש'	ו'	ה'	ד'	ג'	ב'	א'	ימי עבודה נעולים			שם האסטרטגיה	k
														שבוע 2	שבוע 1	סה"כ		
														5	5	10	סגר מלא	0
														5	2	7	3-11	3
														5	1	6	4-10	4
														5	0	5	שבוע כן, שבוע לא	5
														2	2	4	שבוע עבודה 3 ימים	6
														2	1	3	7-7	7
														1	1	2	סוף שבוע ארוך	8
														1	0	1	9-5	9
														0	0	0	סגר רק בסופ"ש	10
														0	0	0	ללא התערבות	14

הערה:

משבצות אפורות מסמנות ימים נעולים.

לוח 5

תוצאות הסימולציה

א. ערך חיים נמוך

$$\chi_1 = 36, \chi_2 = 0$$

אסטרטגיה	T0	T1	T2	סך העלות למתכנן	עלות תת-ייצור	עלות התמותה	מספר מתים הכולל	מספר מתים עקב עומס על מערכת הבריאות
ללא התערבות	540	540	540	0.494	0.023	0.471	121500	56841
סגר מלא עד לחיסון	0	540	540	0.503	0.503	0.000	0	0
k=3	54	70	105	0.208	0.042	0.166	43061	11287
k=4	54	70	105	0.206	0.038	0.168	43484	11674
k=5	54	70	119	0.204	0.041	0.164	42426	11848
k=6	12	28	540	0.207	0.203	0.003	892	0
k=7	0	14	540	0.177	0.160	0.017	4664	0
k=8	40	56	400	0.157	0.081	0.077	19989	1012
k=9	47	74	373	0.149	0.057	0.092	23899	2024
k=10	50	84	540	0.142	0.037	0.105	27330	4342

ב. ערך חיים גבוה

$$\chi_1 = 36, \chi_2 = 64$$

אסטרטגיה	T0	T1	T2	סך העלות למתכנן	עלות תת-ייצור	עלות התמותה	מספר המתים הכולל	מספר מתים עקב עומס על מערכת הבריאות
ללא התערבות	540	540	540	1.332	0.023	1.309	121500	56841
סגר מלא עד לחיסון	0	540	540	0.503	0.503	0.000	0	0
k=3	0	28	371	0.250	0.250	0.000	28	0
k=4	0	14	413	0.235	0.235	0.000	28	0
k=5	0	14	469	0.223	0.223	0.000	18	0
k=6	5	28	540	0.212	0.210	0.002	212	0
k=7	0	42	540	0.188	0.178	0.010	1003	0
k=8	0	79	540	0.187	0.162	0.025	2465	0
k=9	49	123	540	0.295	0.113	0.182	17027	3266
k=10	51	130	540	0.309	0.081	0.228	21314	5547

הערות:

1. הערכים בלוח מתייחסים לתסריט בו החיסון מגיע ביום ה-540.
2. העלויות נקובות בערכים נוכחיים במונחים של תוצר שנתי.

תרשים 8

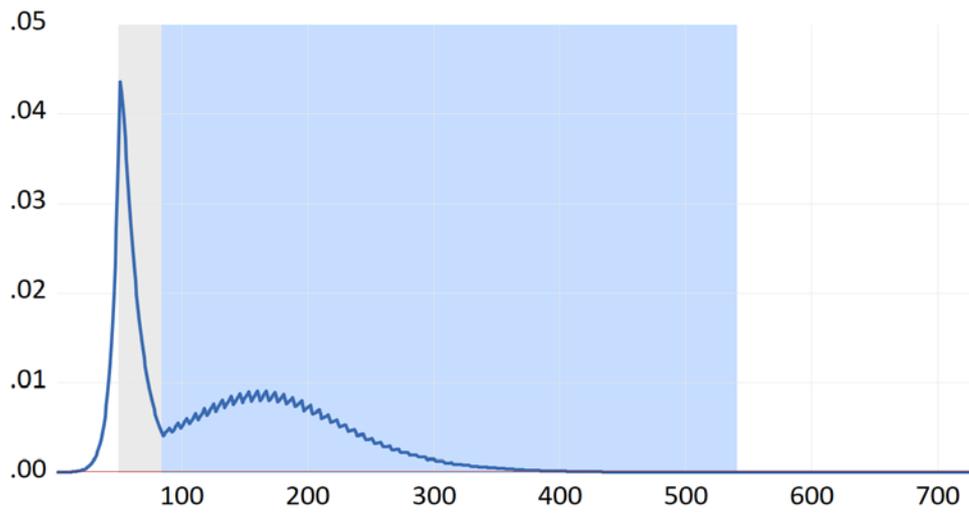
אסטרטגית חיסון העדר

$$\chi_1 = 36, \chi_2 = 0$$

$$k=10$$

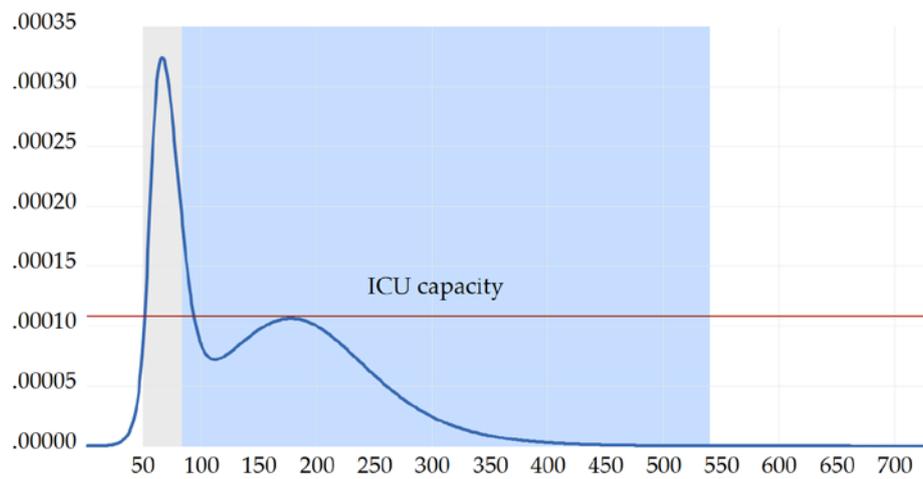
נשאים

E+I

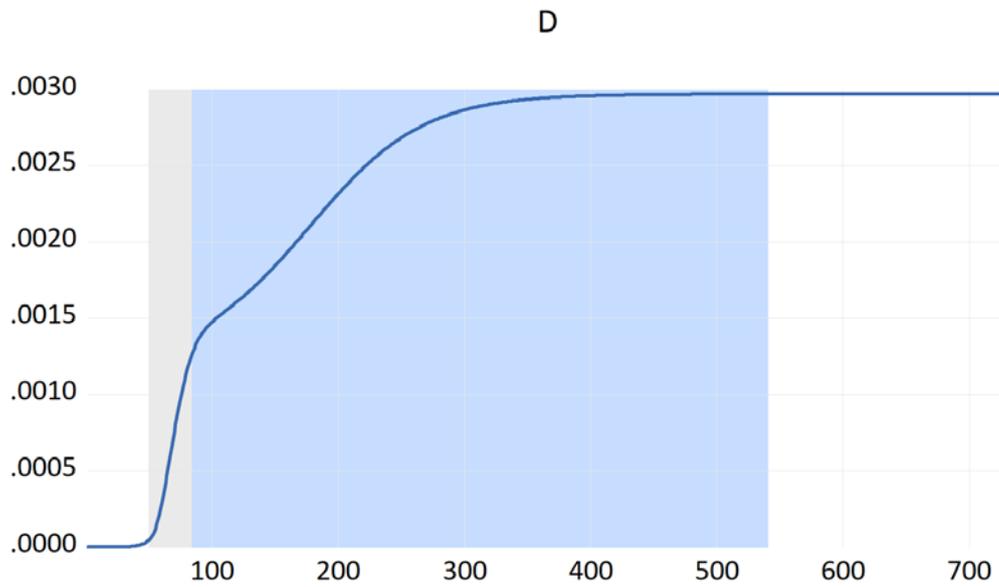


חולים קשים

X



מתים



הערה:

החלק המסומן באפור הוא תקופת הסגר. החלק המסומן בכחול הוא הפעלת האסטרטגיה המחזורית.

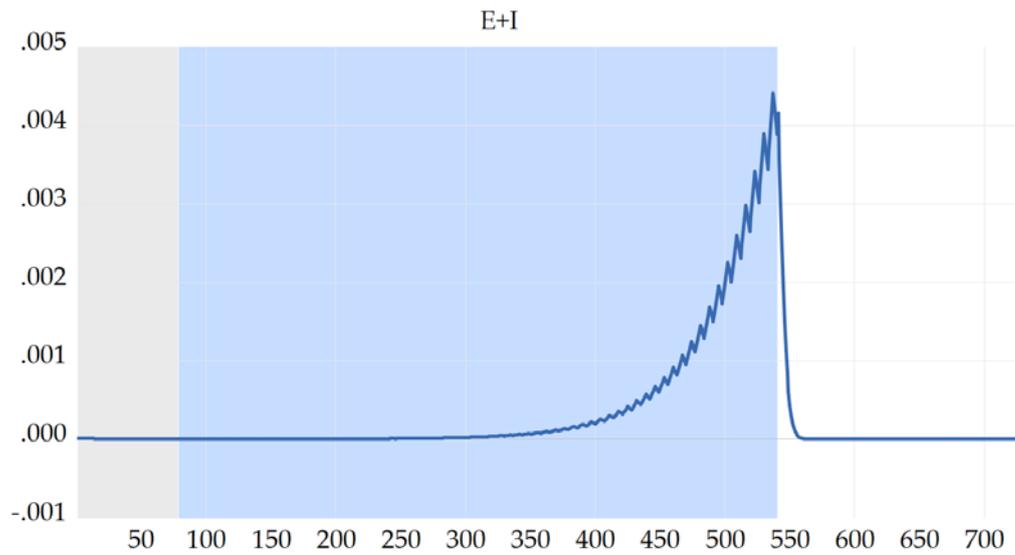
תרשים 9

אסטרטגית המתנה לחיסון

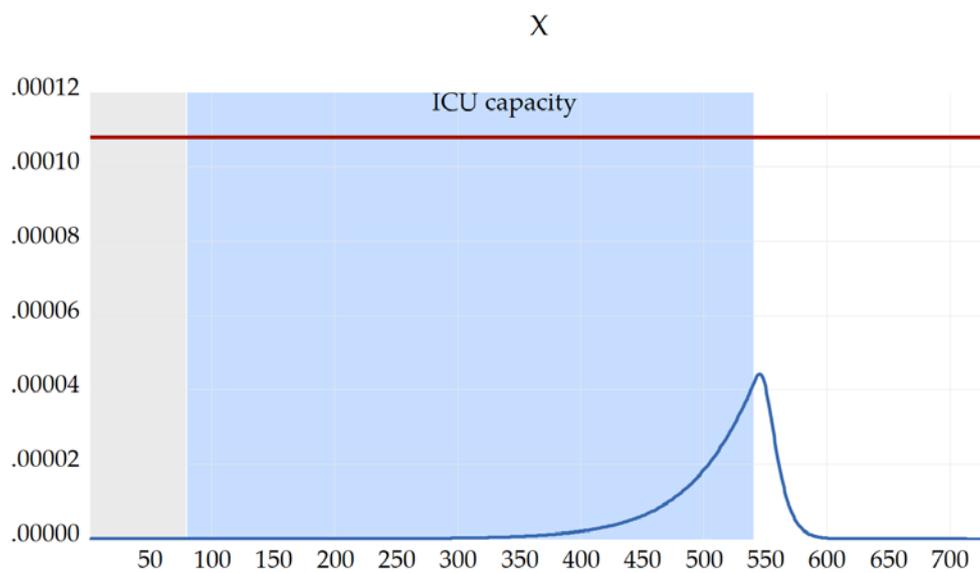
$$\chi_1 = 36, \chi_2 = 64$$

$$k=8$$

נשאים

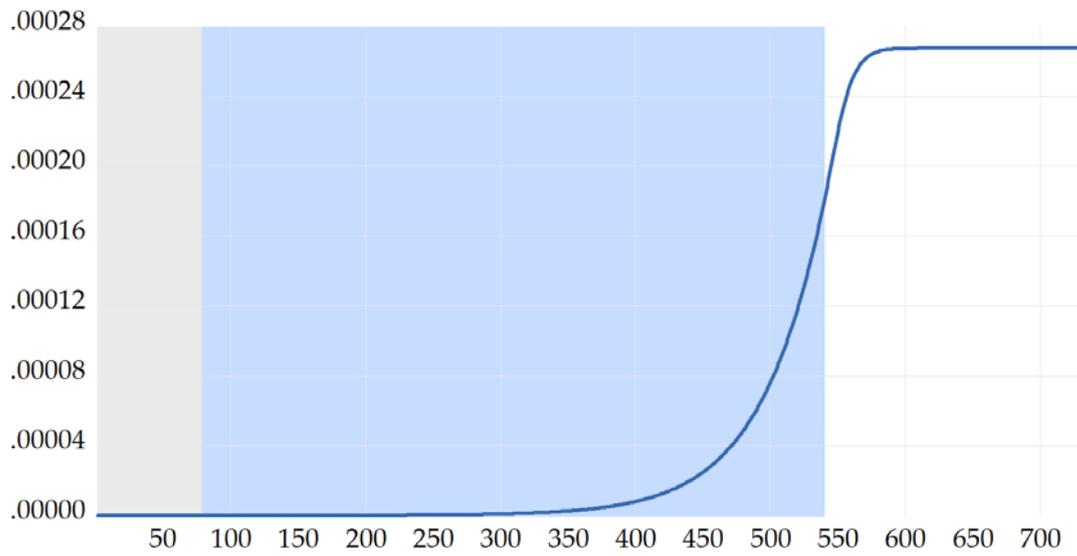


חולים קשים



מתים

D

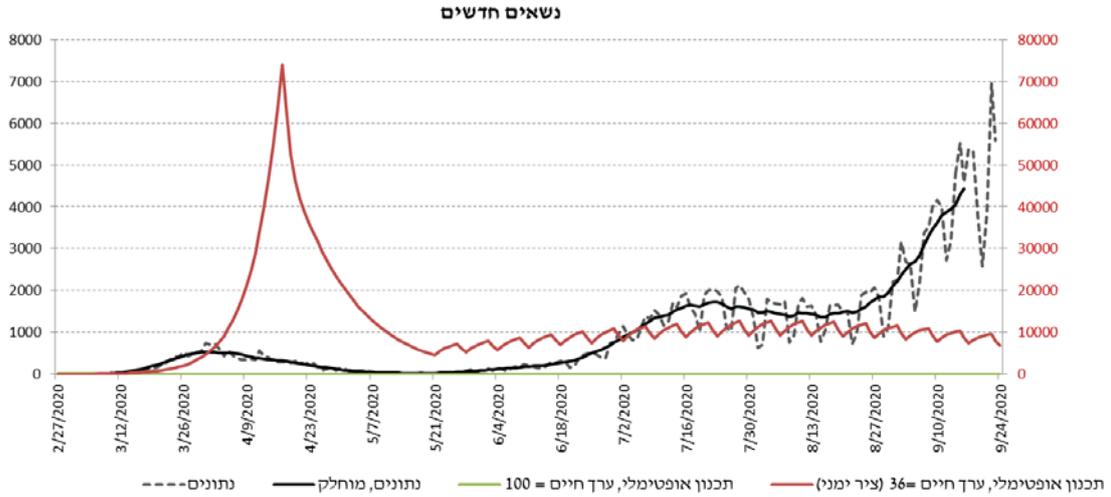


הערה:

החלק המסומן באפור הוא תקופת הסגר. החלק המסומן בכחול הוא הפעלת האסטרטגיה המחזורית.

תרשים 10

נשאים חדשים – בפועל ובאופטימום של המתכנן המרכזי



תרשים 11

סה"כ מתים – בפועל ובאופטימום של המתכנן המרכזי

