



הערכת הקיבולת, הייצור והמחירים במשק חשמל תחרותי בישראל: 2025-2020



שמעון פרנט

קובו ניומן

אירנה מילשטין

אשר טישלר

ולדימיר גורביץ

ד"ר ולדימיר גורביץ הוא בעל תואר שלישי במתמטיקה מאוניברסיטת נובוסיבירסק ברוסיה. כיהן כפרופסור חבר במכון הפוליטכני באירקוטסק (1979-1989). במסגרת עבודתו בחברת החשמל לישראל כיהן כראש מדור מודלים טכנו-כלכליים באגף תפיטי (1996-2017). בשנים 2017-2020 כיהן כמנהל מחלקת פיתוח מערכת הייצור בחברת החשמל לישראל, ומשנת 2020 מכהן באותו תפקיד במסגרת חברת נגה - ניהול מערכת החשמל.

פרופ' אשר טישלר הוא פרופסור אמריטוס בפקולטה לניהול ע"ש קולר באוניברסיטת תל אביב, וכיהן גם כנשיא המכללה למינהל בשנים 2014-2017. במסגרת שירותו בפקולטה לניהול היה דקאן הפקולטה (2007-2014), ראש המכון לניהול אסטרטגי ע"ש אלי הורביץ (2006-2014), ראש המכון לטכנולוגיה וחברה (2006-2010), ראש המכון למחקר עסקים בישראל (1991-1994), המנהל האקדמי של תכניות מביע למנהלים (1993-2003), המנהל האקדמי של להב (1994-1998), ראש החוג לניהול-כלכלה (1986-1988), ופרופסור אורח באוניברסיטאות פנסילבניה, דרום קליפורניה ואיובה. פרסם (לבד או עם שותפים) כ-130 מאמרים בכתבי עת אקדמיים בתחומי כלכלת וניהול ביטחון, כלכלת וניהול אנרגיה, אקונומטריקה, תכנון מתמטי, כלכלה ניהולית, ואסטרטגיה.

ד"ר אירנה מילשטין סיימה את לימודי הדוקטורט בפקולטה לניהול ע"ש קולר באוניברסיטת תל אביב. משנת 2004 היא חברת הסגל האקדמי בפקולטה להנדסת תעשייה וניהול טכנולוגיה במכון טכנולוגי חולון (HIT). פרסמה מאמרים בכתבי עת אקדמיים בתחומי כלכלת וניהול אנרגיה, כלכלת מוצרי מידע ומערכות מידע רפואיות.

יעקב (קובו) ניומן הוא בעל תואר שני בכלכלה מהאוניברסיטה העברית. במסגרת עבודתו בחברת החשמל לישראל כיהן בחטיבת הכספים כראש מדור תעריפים ומדור מחקרים כלכליים (1991-2004), כממונה על תחום הכלכלה והתכנון הפיננסי לטווח ארוך ביחידה לכלכלה ותכנון פיננסי לטווח ארוך (2005-2015), וככלכלן בכיר במחלקת פיתוח מערכת הייצור שבאגף תכנון ופיתוח טכנולוגיה (2016-2020). משנת 2021 הוא כלכלן בכיר בחטיבת התכנון והפיתוח של חברת נגה - ניהול מערכת החשמל.

שמעון פרנט, לשעבר סגן מנהל אגף תכנון ופיתוח טכנולוגיה ומנהל מגזר פיתוח מערכת הייצור בחברת החשמל לישראל, לקח חלק פעיל בקידום תהליכי קבלת ההחלטות בתחום תכנון משק החשמל בישראל. בין היתר, היה מעורב בתכנון הקמת תחנות כוח בפחם ובגז, תחנות אנרגיה שאובה, תחנות רוח ותחנות סולריות. ייצג את האינטרסים של סקטור הייצור החשמל בנושאי הגנת הסביבה, צמצום גזי חממה ופיתוח בר-קיימא של משק האנרגיה בישראל. השתתף בהכנת תוכניות אב במדינות אפריקה ומרכז אמריקה. ייצג את ישראל בקבוצת "Energy Policy" של EURELECTRIC, שייצגה את האינטרסים של תעשיית החשמל ברמה הפאן-אירופית. עבודותיו מצאו ביטוי במאמרים ובמסמכי עבודה רשמיים שהוצגו בפורומים בינלאומיים שונים בתחומי חשמל, אנרגיה ואיכות הסביבה.

תקציר

עבודה זו מיישמת מודל (משחק) דו-שלבי של בניית קיבולת לייצור חשמל (השלב הראשון) וייצור החשמל בכל שעה של היום (השלב השני) בתרחיש של התפתחות משק חשמל תחרותי בישראל בשנים 2025-2050. יישום המודל נעשה עבור שתי טכנולוגיות ייצור, טכנולוגיה סולרית המשתמשת בתאים פוטו-וולטאיים (PV – photovoltaic cells) וגו טבעי, שגם היום הן טכנולוגיות ייצור החשמל העיקריות בישראל. המודל שבו השתמשנו בעבודה זו ניתן לפתרון אנליטי, הוא מחשב את שיווי המשקל במשק החשמל כאשר ייצור החשמל על ידי PV הוא פונקציה של רמת הקרינה של השמש, ומאפשר לחשב את הפתרון המיטבי (במונחי קיבולת, כמויות ייצור ומחירי שיווי משקל), לא רק בטווח הארוך, אלא גם בעת תקופת המעבר ממשק חשמל ריכוזי, שבו קיבולת החשמל גבוהה, למשק חשמל תחרותי שהקיבולת המיטבית בו נמוכה יותר. בניגוד למציאות הנוכחית, בעתיד יהיו מחירי החשמל ביום, שבו עיקר ייצור החשמל יעשה על ידי PV, נמוכים ממחירי החשמל בלילה, שבו כל ייצור החשמל (בהעדר מתקני אגירת חשמל) יעשה על ידי טכנולוגיית הגו. מחירי החשמל הממוצעים, ביום ובלילה, ירדו באופן מונוטוני לאורך השנים, וחלק ייצור החשמל על ידי PV בשנת 2030 יהיה כ-35% מסך ייצור החשמל בשנה זו בישראל (מספר זה גבוה מהיעד הנוכחי של משרד האנרגיה הקובע כי 30% מייצור החשמל ב-2030 יהיה מאנרגיה מתחדשת).

מבוא

שעות היום – הוא נמוך בשעות הבוקר ובשעות אחר הצהריים, וגבוה בשעות הצהריים.

מאמר זה מתייחס לשני הגורמים הללו ומציג יישום של מודל המחשב את תמהיל הקיבולת המיטבי בכל שנה בין השנים 2025-2050 ואת ייצור החשמל בכל שעה משעות היממה במשך אותה תקופה, בהנחה של קיום שוק חשמל תחרותי בישראל עם ביקוש לא ודאי ושתי טכנולוגיות ייצור: PV וגו טבעי.¹ טכנולוגיית ה-PV מייצרת חשמל רק בשעות היום (כאשר השמש זורחת). ייצור חשמל בפועל על ידי קיבולת PV נתונה (הקיבולת האפקטיבית של טכנולוגיית ה-PV) משתנה לאורך היום כפונקציה של קרינת השמש; הוא נמוך בשעות הבוקר ובשעות אחר הצהריים, וגבוה בשעות הצהריים. ייצור החשמל בלילה נעשה על ידי טכנולוגיית הגו, שבה ניתן להשתמש גם בשעות היום. המודל הוא דו-שלבי. יצרני החשמל מחליטים על קיבולת הייצור שלהם בשלב הראשון. בשלב השני, כאשר הקיבולת של יצרני החשמל קבועה וידועה, מחליטים היצרנים כמה חשמל ייצרו וימכרו למנהל המערכת.²

אנו מראים שטכנולוגיית ה-PV מייצרת חשמל בקיבולת אפקטיבית מלאה (התלויה בקרינת השמש) בשעות הבוקר ובשעות אחר הצהריים, ורק בחלק מהקיבולת האפקטיבית

1 בעתיד אנחנו מתכננים להרחיב את המודל המוצג כאן על ידי הוספת אפשרות של שימוש באגירת חשמל, בעיקר סוללות, יחד עם טכנולוגיות ה-PV והגו הטבעי.

2 מנהל המערכת מאון, בכל שעה בנפרד, בין הביקוש (על ידי הצרכנים) וההיצע (על ידי היצרנים) של החשמל, תהליך שבו נקבע מחיר שיווי המשקל השעתי של החשמל.

המאמצים של מדינות רבות להפחית באופן ניכר את פליטת גזי החממה (Greenhouse gases, GHG) בעולם הביאו לפיתוח ושילוב טכנולוגיות ייצור חשמל על ידי אנרגיה מתחדשת, בעיקר תאים פוטו-וולטאיים (Photovoltaic cells, PV) ורוח, במערכות החשמל בעולם (Jacobson et al., 2017); החדירה המהירה של טכנולוגיות PV ורוח לשוקי החשמל בעולם, שאיפה המתמדת לשיפור יעילות מערכות החשמל, וההתקדמות הרבה בפיתוח ויישום הרשת החכמה (smart grid), מאיצות היום גם את המחקר והפיתוח של טכנולוגיות לאחסון חשמל (Cramton, 2017); מדיניות הממשלה להכנסת השימוש באנרגיה מתחדשת לייצור חשמל ושיפורה ממלאת גם היא תפקיד חשוב בגידול המהותי של קיבולת ה-PV במדינות רבות בעולם, ולאחרונה גם בישראל. מדיניות זו כוללת זיכוי מס, מדידת אנרגיה נטו, סחר בפחמן, מימון מערכות ייצור בעלות נמוכה, ועוד (Zarnikau et al., 2019). שילוב טכנולוגיית ה-PV במודלים אנליטיים המחשבים את התמהיל המיטבי של קיבולת הייצור, כמויות הייצור ומחירי שיווי המשקל בשוקי חשמל תחרותיים הוא מורכב וקשה. ראשית, בניגוד לטכנולוגיות ייצור חשמל המשתמשות בגו טבעי או פחם, טכנולוגיית ה-PV יכולה לייצר חשמל רק בשעות היום, תכונה המקשה על ניסוח ופתרון המודל התיאורטי לקבלת תמהיל מיטבי של טכנולוגיות ייצור חשמל בשוק תחרותי. שנית, הייצור בפועל על ידי קיבולת נתונה של טכנולוגיית ה-PV משתנה לאורך

מתמקד בחישוב הקיבולת המיטבית לייצור חשמל וכמויות ומחירי החשמל גם בתקופת המעבר ממשק החשמל הריכוזי הקיים היום בישראל למשק תחרותי (אם משק כזה יתקיים בעתיד, משנת 2025, לדוגמה). מעבר ממשק חשמל ריכוזי למשק חשמל תחרותי מביא לירידה מהותית בקיבולת החשמל המותקנת במשק (ראו Tishler, Milstein & Woo, 2008). לכן ברור שיהיה עודף בקיבולת החשמל בשנים הראשונות של המעבר ממשק חשמל ריכוזי (כמו זה הקיים בשנת 2021) למשק חשמל תחרותי בישראל (במודל המוצג כאן, בשנים 2025-2037), ובנייה של קיבולת חשמל חדשה המשתמשת בדלק קונבנציונלי (טורבינות גז לדוגמה) תתחדש רק בשנת 2038. בנייה של קיבולת חדשה לייצור חשמל על ידי PV עשויה כמובן לקרות מוקדם יותר (כתוצאה מתכנון מוקדם של הממשלה או כתוצאה מפתרון מיטבי של המודל שבו אנחנו משתמשים).

הפרק הבא של המאמר סוקר את הספרות המקצועית המתאימה. בהמשך נאפיין את משק החשמל הישראלי, ונציג את התרחיש המתקבל לפיתוח משק חשמל תחרותי בישראל, הכולל גם את תקופת המעבר ממשק החשמל הריכוזי הקיים היום בישראל למשק חשמל תחרותי. הפרק האחרון מסכם את הממצאים במאמר זה.

סקר ספרות

השימוש באנרגיה מתחדשת בייצור חשמל גדל במהירות רבה בשנים האחרונות (Newbery et al., 2018; IEA, 2018). תופעה זו גרמה להתפתחותם של מחקרים רבים המעריכים את הפוטנציאל של מדינות ואזורים ברחבי העולם לייצר 100% מצריכת החשמל (או קרוב לכך) אך ורק ממקורות אנרגיה מתחדשים (Elliston et al., 2013; Jacobson et al., 2017). מחקרים אלה מצביעים על כך שהגעה ליעד כזה היא אפשרית מבחינה טכנית, אך עשויה להיות יקרה ואולי משבשת כלכלית. עם זאת, אין ספק שעד 2050 תהיה ירידה משמעותית מאוד בחלק היחסי של ייצור החשמל על ידי טכנולוגיות המשתמשות בדלק קונבנציונלי, ובמקביל תהיה עלייה גדולה מאוד בחלק הייצור של חשמל על ידי טכנולוגיות המשתמשות באנרגיה מתחדשת (בעיקר רוח ושמש). (Helm (2016) טוען שדלק שמקורו במאובנים (פחם, גז) נמצא בשפע, סיום השימוש בו עדיין לא נראה באופק, ומחסור בו לא תהיה הסיבה לירידה בשימוש העתידי של

באמצע היום, כאשר קרינת השמש היא מקסימלית. טכנולוגיית הגז הטבעי מייצרת חשמל בשעות הלילה, ולעיתים בחלק משעות היום שבהן טכנולוגיית ה-PV היא בקיבולת אפקטיבית מלאה או קרובה אליה. למעשה, קל להיווכח שהתפקיד העיקרי של השימוש בטכנולוגיית הגז הטבעי במהלך היום הוא צמצום של הקיבולת המותקנת של ה-PV (שאיננה בשימוש בלילה, ונמצאת לעיתים בקיבולת אפקטיבית לא מלאה גם בשעות הצהריים), ומניעת עליות גדולות במחירי החשמל (price spikes) בשעות היום.

מאחר שבניית תחנות כוח גדולות, קבלת רישיון להקמת תחנות כאלה, ופריסת רשת הובלה של חשמל מתחנות הכוח לצרכנים הסופיים היא יקרה מאוד ועורכת זמן רב, חשוב שהממשלה, המפקחת על מערכת החשמל ומחירי החשמל, תוכל להעריך מהי מערכת החשמל המיטבית למדינה ולהיערך להקמתה, להתרחבותה ולשינויים הטכנולוגיים הצפויים בה. מטרת מאמר זה היא להעריך מבחינה כמותית את המשמעויות של התפתחות מחירי התשומות בייצור החשמל והתפתחות טכנולוגיות ייצור החשמל על ידי אנרגיה קונבנציונלית (גז ו/או פחם) ואנרגיה מתחדשת במשק חשמל תחרותי בישראל בשנים 2025-2050. תוכנית הפיתוח של קיבולת החשמל בישראל עד סוף 2024 ידועה כבר היום מאחר שהקמת תחנות כוח קונבנציונליות נמשכת 5-10 שנים, וחלק ייצור החשמל על ידי תחנות כוח המופעלות על ידי PV עד 2030 (במשק ריכוזי) נקבע על ידי שר האנרגיה בשנת 2020.³ לכן, פתרון המודל להערכת התפתחות משק החשמל הישראלי במאמר זה מוצג עבור השנים 2025-2050. המאמר מציג תרחיש (חיזוי) אפשרי להתפתחות משק חשמל תחרותי בישראל על בסיס טכנולוגיות PV וזג טבעי, ומדגיש את מקומם של התאים הפוטו-וולטאים (PV) בשוק תחרותי. במסגרת זו הנחנו שהביקוש לחשמל בישראל בשנים 2025-2050 יגדל על פי תחזית בנק ישראל (Galo, 2017) בסך של 2.8% לשנה.

המודל לחישוב הקיבולת המיטבית, כמויות הייצור ומחירי שיווי המשקל של החשמל במשק חשמל תחרותי בישראל (משק שבו מחירי החשמל נקבעים על ידי אינטראקציה בין הביקוש וההיצע של החשמל, יצרני החשמל משיאים רווחים וצרכני החשמל משיאים את התועלת שלהם) נלקח מ-Milstein & Tishler (2012) עם הרחבה לשימוש ב-PV עם תפוקת חשמל שהיא פונקציה של רמת הקרינה המשתנה של השמש על פני שעות היום. השימוש במודל זה, שיש לו פתרון אנליטי,

3 ראו https://www.gov.il/he/Departments/news/press_251020

באנרגיה מתחדשת יהיו שונים בתכלית מהשווקים הקיימים, וכי תפקידה של הממשלה בשווקים אלה יהיה משמעותי ושוונה מזה הקיים היום.

השירותים העיקריים שמציע אחסון חשמל הם מענה מהיר מאוד לעליית הביקוש ו/או הפסקות באספקת החשמל, אספקת חשמל ללקוחות (בדומה לטכנולוגיות ייצור המשתמשות בגז, PV ורוח), וכן פתרון בעיות העלויות להיגרם בשל הזמינות החלקית של חשמל מאנרגיה מתחדשת במשך שעות היממה (ייצור חשמל על ידי PV תלוי בקרינת השמש, ואספקת חשמל על ידי רוח תלויה ברוח מתאימה). במילים אחרות, טכנולוגיות אחסון חשמל, במיוחד סוללות, יכולות לאגור חשמל בתקופות של אספקת שיא ולספק חשמל לצרכנים כאשר ערך החשמל הוא גבוה (Cramton, 2017). מכיוון שאחסון חשמל, הולכת והעברת חשמל באזור גיאוגרפי נתון, ומדיניות של ניהול הביקוש לחשמל הם מוצרים תחליפיים, ייתכנו מספר פתרונות שונים של שיווי משקל לתוכנית של הרחבת מערכת החשמל הנתונה (Newbery, 2016), והממשלה תצטרך להחליט מהו הפתרון העדיף למשק (Chao & Wilson, 2020).

תוצאות המחקר המוצג כאן מראות שסביר מאוד שיצרני החשמל על ידי טכנולוגיית ה-PV (שעלות הייצור שלה היא בקירוב אפס ומספר היצרנים המשתמשים בה הוא גדול), לא יוכלו לכסות את העלויות הקבועות שלהם בשוק חשמל תחרותי, ולכן שוק כזה יתקשה להתקיים ללא התערבות הממשלה. לפיכך, ייתכן שבשוק חשמל הכולל הרבה יצרנים המשתמשים ב-PV יהיה צורך במנגנוני תשלום גם עבור קיבולת (capacity payments) בנוסף על התשלום המקובל עבור אנרגיה, כדי לאפשר פעילות סדורה של שוק זה. Traber (2017) ו-Milstein & Tishler (2019) מתארים מנגנונים המאפשרים פעילות סדורה של שווקים כאלה, ומציגים מצבים שבהם השימוש במחירי קיבולת יחד עם מחירי אנרגיה יביאו לרווחה חברתית גבוהה יותר מאשר בשווקים ללא תשלום עבור קיבולת. לחילופין, המפקחים צריכים לשקול מבני שוק שונים מאלה הקיימים היום (Newbery et al., 2018).

דלק זה. Helm מראה כי טכנולוגיות חדשות לייצור ואחסון חשמל וטכנולוגיות חכמות בתחום מערכות המידע, יחד עם התפתחות השימוש במכונות חשמליות והמעבר לדיגיטציה מוכוננת שימוש בחשמל בתעשייה, יגדילו את הביקוש לחשמל, אך לא את הביקוש לדלק קונבנציונלי (גז ופחם). Green & Staffell (2016) מעריכים כי בעוד שהשימוש בפחם יקטן מאוד בעתיד, השימוש בגז הטבעי לייצור חשמל ימשיך להיות גדול מאוד עוד זמן רב בעתיד, בעיקר עקב הגמישות הרבה בשימוש בטכנולוגיה זו. המאמר של Jacobson et al. (2017) מציג מתודולוגיה להחלפת כל טכנולוגיות ייצור החשמל המשתמשות בדלק קונבנציונלי בטכנולוגיות המשתמשות באנרגיה מתחדשת (בעיקר באמצעות רוח ושמש) עד שנת 2050. Jacobson et al. (2017) מראים עבור מדגם של 139 מדינות, כי העלות לייצור MWh חשמל בשנת 2050 על ידי אנרגיה מתחדשת תהיה שווה לעלות החשמל המיוצר על ידי תרחיש של "עסקים כרגיל" המשתמש גם בדלק קונבנציונלי, ושהמעבר לאנרגיה מתחדשת יביא לירידה מהותית בזיהום האוויר ובנזקים מהתחממות כדור הארץ.

עדיין נדיר יחסית למצוא מודלים אנליטיים של שוקי חשמל תחרותיים שמהם ניתן לפתור את תמהיל הקיבולת המיטבית של טכנולוגיות ייצור המשתמשות בדלק קונבנציונלי יחד עם טכנולוגיות המשתמשות באנרגיה מתחדשת, כגון PV או רוח. ככלל, מודלים אלה משולבים בתהליך קבלת החלטות די-שלב, שמטרתו להסביר את היחסים המורכבים בין עלויות בניית קיבולת החשמל לבין כמויות ייצור החשמל ומחירי החשמל בכל שעות היממה. Milstein & Tishler (2015) מציגים מודל הפותר את תמהיל הקיבולת המיטבי באמצעות ייצור חשמל על ידי טכנולוגיות גז ו-PV, תוך התמקדות בזמינות קיבולת ה-PV במשך שעות היממה. הם מראים כי עלויות מחירי החשמל גבוהות יותר ותכופות יותר ככל שקיבולת ה-PV גבוהה יותר. לפיכך, מחיר החשמל הממוצע עשוי לעלות כאשר עלויות הבנייה של קיבולת ה-PV יורדות בעקבות שיפורים טכנולוגיים, תכונה המקנה כוח שוק ורווחים גבוהים ליצרנים שמשמשים בטכנולוגיות המתבססות על דלק קונבנציונלי (הזמין בכל שעות היממה).

Newbery et al. (2018) מתארים סוגי מדיניות שונים לתכנון מערכת חשמל אירופית עתידית, המתאפיינת בשימוש גבוה מאוד באנרגיה מתחדשת, ומתייחסים בין היתר לאחסון חשמל, תמחור חשמל וניהול סיכונים. Newbery et al. (2018) מציגים כי שוקי חשמל המבוססים על שימוש נרחב

משק החשמל בישראל: רקע ונתונים

בשנת 2021 משק החשמל הישראלי הוא עדיין ריכוזי, ומחירי החשמל בו נקבעים על ידי משרד האנרגיה.⁴ הקמת רשות החשמל בשנת 1996 נתנה את האות לתחילת ביזור משק החשמל בישראל, שתופעל עד אז באופן מלא (ייצור, הולכת חשמל, חלוקת ואספקת חשמל) על ידי חברת החשמל לישראל (חח"י). הצעד הראשון של משרד האנרגיה ליישום תחרות במשק החשמל⁵ נעשה על ידי מתן רישיונות ייצור חשמל למספר יצרני חשמל פרטיים וכן הגבלת ייצור החשמל על ידי חברת החשמל לישראל (חח"י) (PUA, 2018). בתחילת המאה ה-21 החלו להיכנס לשוק יצרני חשמל פרטיים, וחלקם בקיבולת המותקנת (בסך ייצור) של החשמל בשנת 2019 עמד על 29% (34%). מטרת משרד האנרגיה היא שייצרנים פרטיים ייצרו כ-60% מסך צריכת החשמל בישראל בשנת 2025, ושהקיבולת המותקנת של חשמל בישראל בשנה זו תהיה 19.3 GW, כאשר בשנת 2019 הייתה קיבולת הייצור 17.7 GW (PUA, 2020). הרפורמה במשק החשמל בשנת 2018 (PUA, 2018, 2019), המהווה את הצעד המהותי השני ליישום תחרות מלאה במשק החשמל בישראל, הביאה לפיצול בין מינהל מערכת החשמל (הגוף האחראי על תכנון משק החשמל בישראל ועל יצירת שיווי משקל בין היצע החשמל והביקוש לו) לבין חח"י, והפכה את המינהל לחברה ממשלתית עצמאית. העקרונות החשובים ביותר של הרפורמה במשק החשמל בשנת 2018 הם: (א) תכנון וניהול מערכת החשמל יוצאו מחח"י ויעברו לחברה ממשלתית נפרדת (צעד זה החל בשנת 2020 ואמור להסתיים בסוף 2021), (ב) חח"י תמכור חלק ניכר מתחנות הכוח שלה ליצרנים פרטיים ותימנע מהקמת תחנות כוח חדשות (להוציא הקמה של שתי יחידות המשתמשות בנו באתר אורות רבין) ו/או שיפור מהותי של תחנות כוח קיימות, (ג) חח"י תישאר מונופול במגזר ההולכה והחלוקה, (ד) מגזר האספקה לצרכני מתח גבוה, עליון ועל-עליון ייפתח לתחרות. לדעת משרד האנרגיה, עקרונות אלה אמורים לשפר את התחרותיות במשק החשמל בישראל, לקדם את ביזור (ואולי גם הפרטת) כל ייצור החשמל בישראל, ולהביא בעתיד לקיום משק חשמל תחרותי בישראל (משק שבו

מחירי החשמל נקבעים על ידי השוק).⁶ אומנם עדיין לא ידוע מתי יהיה משק החשמל הישראלי תחרותי, אבל סביר להניח שזה יקרה בעתיד הנראה לעין, ולו רק עקב חוסר היכולת של הממשלה לנהל באופן יעיל משק חשמל הכולל מספר רב של יצרני חשמל מבוזרים המשתמשים ב-PV.

להערכתנו, עם צמצום הריכוזיות במשק החשמל הישראלי הצפוי לקראת אמצע העשור הנוכחי, פתיחת משק זה לתחרות מלאה עדיפה לצרכני החשמל בישראל על פני קיומו של משק חשמל ריכוזי. אנו מניחים שייצור החשמל בתקופה זו ייעשה על ידי שתי טכנולוגיות, זו טבעי (הטכנולוגיה העיקרית לייצור חשמל היום) ו-PV (הטכנולוגיה שמתפתחת במהירות בימים אלה, ולפי משרד האנרגיה אמורה לייצר בשנת 2030 את החלק הארי מסך ייצור החשמל באמצעות אנרגיה מתחדשת – כ-30% מסך ייצור החשמל בישראל).^{7,8} כפי שצויין לעיל, בעתיד אנחנו מתכננים להרחיב את המודל הנוכחי כדי שישלול גם אמצעים לאגירת חשמל. טבלה 1 מציגה מספר מאפיינים של צריכת החשמל השנתית בישראל בשנת 2016.⁹

טבלה 1: ממוצע ומקסימום צריכת החשמל היומית לשעה בשנת 2016 (GWh)

צריכת חשמל ממוצעת לשעה	צריכת חשמל מקסימלית לשעה	
7.66	9.22	ממוצע
7.50	9.12	חציון
1.16	1.51	סטיית תקן
5.42	6.34	מינימום
10.10	12.61	מקסימום

6 ראו Energy Ministry (2018).
 7 נתונים מפורטים על משק החשמל הישראלי, כולל נתוני עבר והערכות למספר שנים בעתיד, נמצאים במסמך "קובץ בסיס הנתונים לעדכון הדו"ח - 2019" באתר רשות החשמל (<https://www.gov.il/he/departments/general/dochmeshek>). תיאור מפורט של טכנולוגיות המשתמשות באנרגיה מתחדשת ונתונים על מצאי ומחירי טכנולוגיות אלה בעולם בכלל ובישראל בפרט נמצא במאמר של שחק (2020).
 8 אחוז הייצור של חשמל על ידי אנרגיה מתחדשת (בעיקר PV) אמור היה לעמוד, על פי היעדים שפרסם משרד האנרגיה בישראל, על 10% בשנת 2020, ועל 30% בשנת 2030. הייצור בפועל על ידי אנרגיה מתחדשת בשנת 2020 עמד על כ-6% בלבד מסך ייצור החשמל בשנה זו (ראו <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001364528>). או עמוד 10 בדוחות הכספיים של חח"י לשנת 2020).
 9 נתוני צריכת החשמל השנתית בשנת 2016 התקבלו מחח"י והיו הנתונים השנתיים האחרונים שהיו זמינים לנו בזמן עריכת המחקר. בשנים האחרונות מועברים נתוני צריכת החשמל השנתית ממנהל המערכת לרשות החשמל ומפורסמים לקהל הרחב (ראו <https://www.gov.il/he/departments/general/hovatdivuahnetunim>).

4 אלמנטים שונים של תחרות, כמו הסכמים דו-צדדיים בין יצרנים לצרכני חשמל גדולים, קיימים כבר היום בישראל.
 5 לתיאור מבנה והתפתחות משק החשמל בישראל ראו: https://he.wikipedia.org/wiki/%D7%A9%D7%A7%D7%9C_%D7%91%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C_%D7%99%D7%A9%D7%A8%D7%90%D7%9C

משק חשמל תחרותי בישראל: הערכת התפתחות בין השנים 2025-2050

פרק זה מציג פתרונות מיטביים, שהתקבלו באמצעות המודל שתיארנו במבוא של המאמר, למשק חשמל תחרותי בישראל הכולל שתי טכנולוגיות לייצור חשמל: PV וגז. חישוב הקיבולת ותמהיל הקיבולת לכל שנה בנפרד בשנים 2025-2050, וחיזוי הצריכה השעתית בכל יום בשנים 2025-2050, נעשה על ידי שימוש במודל של (Milstein & Tishler, 2012) עם התאמה לשימוש ב-PV עם תפוקת חשמל שהיא פונקציה של רמת הקרינה המשתנה של השמש על פני שעות היום. כפי ש-(Milstein & Tishler, 2021) מציינים, ייצוג ההשתנות של תפוקת החשמל של קיבולת PV נתונה במשך שעות היום על ידי שתי רמות של תפוקה אפקטיבית, בשעות השיא של תפוקת קיבולת ה-PV (שעות הצהריים) וביתר שעות היום (שעות הבוקר ואחרי הצהריים), מהווה קירוב מספק להשתנות זו במשך כל שעות היום. לאחר מספר ניסויים בחרנו להשתמש ברמת תפוקה אפקטיבית של 70% מסך קיבולת ה-PV בשעות של אמצע היום, שבהן ייצור החשמל על ידי PV הוא גבוה (11:00-16:00), ו-30% מסך קיבולת ה-PV בתחילת היום (08:00-11:00) ובסופו (16:00-18:00).

המודל של (Milstein & Tishler, 2012) פותר משחק (מודל) דו-שלבי עבור משק חשמל עם שתי טכנולוגיות ייצור (PV ו-גז), כאשר הביקוש לחשמל הוא לא ודאי (כפונקציה של מזג האוויר, לדוגמה), ומספר ידוע של יצרני חשמל שכל אחד מהם משתמש בטכנולוגיית ייצור אחת (PV או גז). בשלב הראשון של המשחק בוחר כל יצרן את קיבולת הייצור שלו כך שתשיא את תוחלת הרווח שלו, כאשר הוא יודע את העלויות הקבועות והמשתנות של ייצור החשמל בכל טכנולוגיה ואת תוחלת הביקוש השעתית לחשמל (אבל לא את הכמות המבוקשת בפועל) בכל שעה. בשלב השני, כאשר הביקוש השעתי לחשמל ב-24 השעות הבאות ידוע, קובעים יצרני החשמל את כמויות ייצור החשמל שהם ייצרו בכל אחת משעות היום הבא כך שסך רווחיהם באותו יום יהיו מקסימליים, בכפיפות למגבלה שהייצור המקסימלי של כל יצרן בכל אחת מהשעות של היום הבא איננו יכול לעלות על הקיבולת שהוא בנה בשלב הראשון של המשחק. השלב השני של המשחק חוזר על עצמו (באופן בלתי תלוי) בכל אחד מהימים בשנה במשך 2025-2050.¹²

12 תיאור פורמלי של המודל יישלח על ידי המחברים לכל מי שביקש אותו.

בחינת התפלגות ייצור חשמל על ידי טכנולוגיית ה-PV במשך שעות היום על בסיס מדגם של תחנות כוח המשתמשות ב-PV בהספק כולל של כ-300 MW בשעות 06:00 עד 20:00 בשנת 2016, מראה שייצור החשמל של קיבולת נתונה של PV הוא נמוך מאוד עד 08:00 ואחרי 18:00. לכן, בחרנו להגדיר בעבודה זו את השעות 08:00-18:00 כשעות יום שבהן ייצור החשמל יעשה על ידי טכנולוגיות PV וייתכן שגם על ידי גז, ואת שאר שעות היממה (00:00-08:00, 18:00-24:00) כשעות לילה שבהן ייצור החשמל יעשה רק על ידי טכנולוגיית הגז.

בהערכת התפתחות משק חשמל תחרותי בישראל בשנים 2025-2050 הנחנו שהעלות המשתנה של טכנולוגיית ה-PV היא אפס, ושהעלות הקבועה של טכנולוגיה זו היא \$52,560 ל-MW/year בשנים 2025-2034, ו-\$35,040 ל-MW/year בשנים 2035-2050.¹⁰ העלות הקבועה של קיבולת הגז היא \$11,545 ל-MW/year, והעלות המשתנה של גז טבעי תישאר קבועה לאורך כל תקופת החיזוי ברמה של \$33.7 ל-MWh (ראו Milstein & Tishler, 2019). מספר יצרני החשמל המשמעותיים המשתמשים בטכנולוגיית הגז (טכנולוגיית ה-PV) יעלה על פי הערכתנו בהדרגה מ-20 (50) בשנת 2025 ועד 30 (100) בשנת 2050 (PUA, 2018, 2019).¹¹

10 מכחים לייצור חשמל בישראל על ידי PV מחייבים את המציעים לציין את מחיר החשמל שהם יגבו מצרכני החשמל. חישוב עלויות הקיבולת של PV במאמר זה מניח שייצור החשמל השנתי על ידי PV יהווה כ-20% מסך הקיבולת הנומינלית של טכנולוגיה זו (כמות הייצור של טכנולוגיית PV תלויה ברמת הקרינה של השמש, אין ייצור בלילה, מקסימום הייצור הוא בשעות הצהריים, ופחות מכך בשעות הבוקר ואחרי הצהריים). עלות קיבולת של 52,600 (35,040) דולר ל-MW/year נגזרת ממחיר של 3 (2) סנט ל-KWh. בשנת 2018 היה חלק ניכר מהצעות המחיר במכר של משרד האנרגיה בסביבות 4 סנט ל-KWh (ראו PUA, 2018).

11 יצרני החשמל הבינוניים המציעים טכנולוגיית PV בישראל הם חברים (בדרך כלל) ב"איגוד חברות אנרגיה ירוקה לישראל". ב-2021 היו כ-40 חברים באיגוד זה (<http://www.greenrg.org.il/he-il/union-members.htm?m=class28>). סביר להניח שמספר יצרני החשמל המשתמשים ב-PV יגדל לאורך זמן, אבל גודל פרויקט ייצור של PV, שבו אין יתרון משמעותי לגודל בניגוד לתחנת ייצור על ידי גז טבעי, יישאר בסדר גודל הדומה לפרויקט ייצור על ידי PV בשנת 2021. בנוסף, אנחנו מניחים שיצרני חשמל קטנים מאוד (משקי בית, חברות המייצרות חשמל על גנות, וכו') יוכלו למכור את החשמל שייצרו למינהל מערכת החשמל (ISO) בישראל במחיר שייקבע מראש.

בניגוד למשק חשמל ריכוזי שבו נקבעים מחירי החשמל על ידי המפקח (משרד האנרגיה), במשק חשמל תחרותי נקבעים מחירי החשמל על ידי ביקוש והיצע. בשעות שבהן הביקוש לחשמל במשק נבוא, ובמיוחד בשעות שבהן הביקוש לחשמל שווה ברמתו לקיבולת האפקטיבית, מחירי החשמל עולים (לעיתים במאות אחוזים) למשך זמן קצר, וגורמים לירידה בכמות המבוקשת של החשמל באותה שעה.

החיזוי לאורך תקופת התכנון נעשה על ידי פתרון המודל בכל שנה בנפרד (מודל time step), כאשר סך הקיבולת בכל שנה, בכל טכנולוגיה בנפרד, שווה למקסימום בין הקיבולת של סוף השנה הקודמת או לפתרון המיטבי של השנה הנוכחית. הקיבולת ההתחלתית של טכנולוגיית הגז בשנת 2025 שווה לקיבולת הידועה היום (בשנת 2021) של אותה שנה (כבר היום ידוע שלא תהיה כניסה של תחנות כוח חדשות המופעלות על ידי דלק קונבנציונלי שאין להן רישיון בנייה היום). פתרון מודל ה-time step מהווה קירוב (וייתכן שיהיה אף זהה) לפתרון של מודל דינמי לאורך כל תקופת החיזוי, מאחר שסך הביקוש לחשמל עולה בקצב אחיד בכל שנה, התפלגות הביקוש השעתי על פני היום והשנה דומה לאורך תקופת החיזוי, ומחירי התשומות ועלויות ההקמה משתנים לאט, בצורה מונוטונית ובאופן עקבי על פני תקופת החיזוי.¹³ הפתרון נעשה לכל שנה בנפרד לשעות היום (08:00-18:00) שבהן ניתן לייצר חשמל על ידי טכנולוגיית גז וטכנולוגיית PV, ועבור שעות הלילה (00:00-08:00, 18:00-24:00) שבהן ניתן לייצר חשמל אך ורק על ידי טכנולוגיית הגז. פתרון המודל עבור 2025 עד 2050 מוצג באיורים 1-6.

בתחילת תקופת התחרות, בשנים 2025-2037, הקיבולת המותקנת של טכנולוגיית הגז נקבעת בהתאם לקיבולת הקיימת של תחנות הכוח המונעות על ידי גז בסוף שנת 2024, שהיא גבוהה משמעותית מהקיבולת המיטבית של טכנולוגיה זו המתקבלת במודל של משק חשמל תחרותי. סך קיבולת ייצור החשמל על ידי גז הולכת וקטנה משנת 2025 ואילך (בשל גריסת חלק מתחנות הכוח הקיימות) עד שנת 2037, שבה הקיבולת המיטבית של טכנולוגיית הגז בשוק תחרותי שווה לקיבולת הקיימת בסוף 2037. משנת 2038 ואילך הקיבולת המשתמשת בגז נקבעת על פי הקיבולת המיטבית של טכנולוגיה זו המתקבלת במודל של משק חשמל תחרותי.

איור 1 מציג את הקיבולת המיטבית ואת הקיבולת הקיימת של טכנולוגיית הגז בתקופת המעבר, עד 2025.¹⁴

איור 2 מציג את ההתפלגות המיטבית של קיבולת טכנולוגיית הגז הטבעי (פסים כחולים) וטכנולוגיית ה-PV (צבע לבן חלק) לאורך כל תקופת החיזוי (2025-2050).

איור 3 מציג את המחיר הממוצע, המקסימלי והמינימלי של חשמל בשעות היום בתקופה 2025-2050. מחיר זה הולך ויורד לאורך תקופת החיזוי בעקבות הכניסה המתמשכת של קיבולת PV והירידה בעלות הקמת קיבולת PV בשנת 2035.

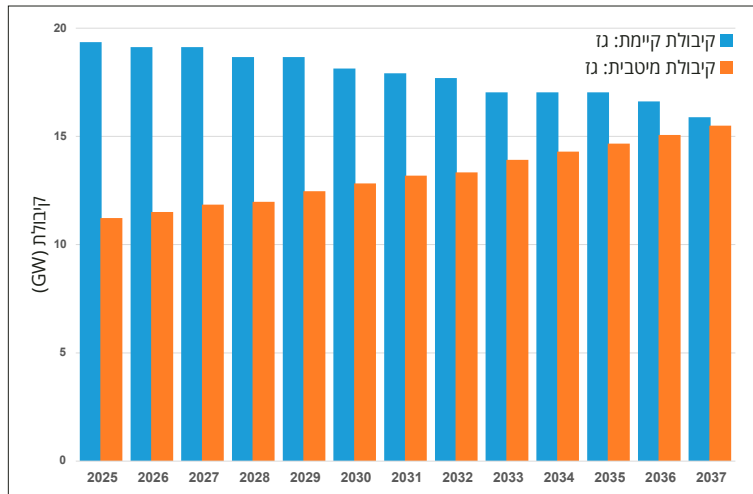
איור 4 מציג את התפלגות מחירי החשמל השנתיים (מחיר מינימלי, ממוצע ומקסימלי) בשעות הלילה בשנים 2025-2050. השינויים במחירים אלה יציבים יחסית עד 2038, השנה הראשונה שבה תהיה בנייה של תחנות כוח חדשות המשתמשות בטכנולוגיית הגז. ייצור החשמל במשך היום בשנים 2025-2037 ייעשה בדרך כלל עם עודף של קיבולת גז (שנבנתה במשך התקופה שבה היה משק החשמל ריכוזי). בתחילת 2030 ואילך תהיינה יותר ויותר שעות במשך הלילה שבהן ייצור החשמל ייעשה על ידי קיבולת הקרובה או שווה למקסימום הקיים. משנת 2038 ואילך התפלגות השעות שבהן ייצור החשמל נעשה עם הקיבולת המקסימלית של טכנולוגיית הגז איננה משתנה יותר באופן משמעותי.

חשוב לציין שבשעות שבהן ייצור החשמל במשק תחרותי נעשה על ידי קיבולת מלאה או קרוב לקיבולת מלאה, מחירי החשמל יהיו גבוהים מאוד. קיומם של מחירים גבוהים מאוד במשך מספר שעות קטן במשך השנה מאפשר ליצרני החשמל במשק חשמל תחרותי לייצר חשמל עם פחות קיבולת מאשר במשק חשמל ריכוזי שבו מחיר החשמל איננו משתנה על פני שעות היממה או שהשינויים בו הם קטנים יחסית (על פי תעריפי עומס וזמן, לדוגמה). ניתן גם להראות שסך ייצור החשמל השנתי בשנים 2025-2050 במשק חשמל תחרותי ובמשק חשמל ריכוזי דומה מאוד, מאחר שגמישות המחיר של הביקוש נמוכה מאוד והתגובה של הצרכנים לעלויות מחירים גבוהות מתבטאת בירידה קטנה יחסית בכמויות המבוקשות של חשמל. לעומת זאת, קיבולת הייצור במשק חשמל תחרותי קטנה באופן משמעותי מהקיבולת במשק חשמל ריכוזי.

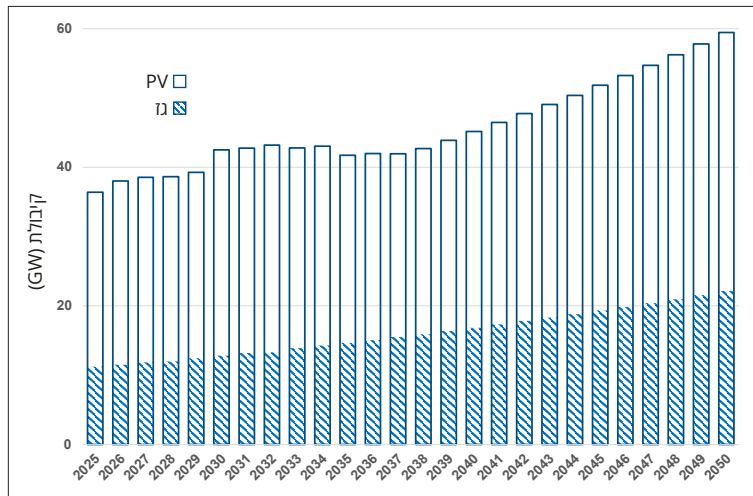
14 מאחר שהקיבולת הקיימת של טכנולוגיית הגז (אבל לא הקיבולת הקיימת של טכנולוגיית ה-PV) גבוהה יותר מהקיבולת המיטבית של טכנולוגיית הגז עד 2037, אנחנו משתמשים בקיבולת הגז הקיימת בפתרון השלב השני של המודל עד 2037 (כולל).

13 (1983) Zahavi & Tishler, Levin, הראו, עבור מודל של משק חשמל ריכוזי, מהם התנאים הנדרשים כדי שפתרון מודל ה-time-step יהיה זהה לפתרון של מודל דינמי.

איור 1: קיבולת הגז המיטבית (GW) וקיבולת הגז הקיימת (GW) בשנים 2025-2037



איור 2: הקיבולת המיטבית של PV ושל גז (GW) בשנים 2025-2050

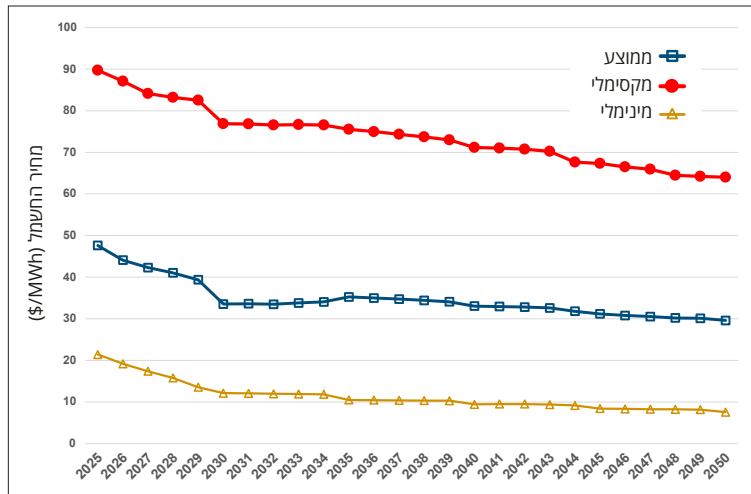


חיוביים החל משנת 2031, ובשנת 2038, כאשר תתחיל בנייה נוספת של תחנות כוח המשתמשות בגז, יגיעו לסך של כ-20% מהכנסותיהם. רווחי יצרני החשמל המשתמשים בטכנולוגיית ה-PV יהיו קטנים יחסית להכנסותיהם לאורך כל תקופת החיזוי. תופעה זו נובעת מכך שעלויות התפעול של טכנולוגיית ה-PV היא אפסית, ואילו מספר יצרני החשמל בטכנולוגיה זו, בניגוד למספר יצרני החשמל המשתמשים בגז, הוא גדול מאוד (אין בטכנולוגיית ה-PV, בניגוד לטכנולוגיית הגז, יתרונות מהותיים לגודל). תופעה זו תחייב את המפקח על משק החשמל להתערב בשוק על ידי שימוש במחירי קיבולת (capacity payments) או על ידי החלת מבנה שוק שונה מזה הקיים היום בשווקים תחרותיים כדי למנוע כשל שוק

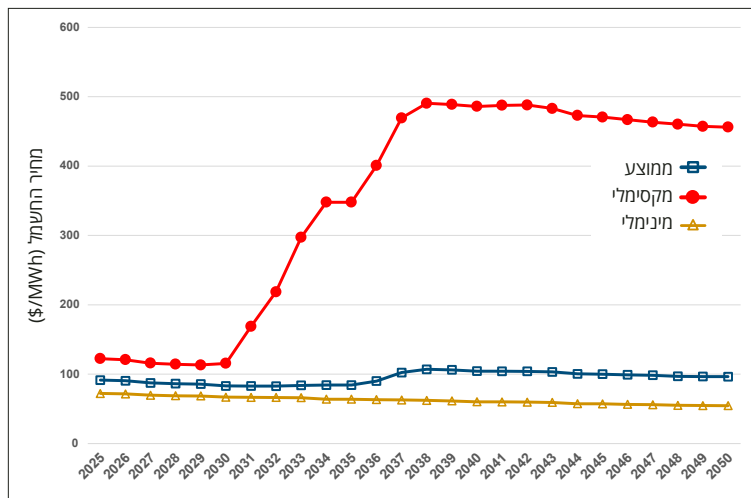
התפלגות סך הייצור השנתי בין טכנולוגיות הגז וה-PV בשנים 2025-2050 מוצגת באיור 5. אומנם רוב הקיבולת היא של טכנולוגיית ה-PV (ראו איור 2), אך רוב הייצור החשמל ייעשה על ידי טכנולוגיית הגז מאחר שטכנולוגיית ה-PV מייצרת חשמל רק בשעות היום ואפקטיביות הייצור שלה נמוכה, בעיקר בשעות הבוקר ובשעות אחר הצהריים המאוחרות.

איור 6 מציג את רווחי יצרני החשמל המשתמשים בגז וב-PV. רווחי יצרני החשמל המשתמשים בטכנולוגיית הגז יהיו שליליים עד 2030 עקב עודף הקיבולת הגדול של טכנולוגיית הגז הנובע מהמעבר ממשק חשמל ריכוזי למשק חשמל תחרותי בשנת 2025. רווחי היצרנים המשתמשים בגז יהיו

איור 3: מחיר החשמל הממוצע, המקסימלי והמינימלי בשעות היום בשנים 2025-2050



איור 4: מחיר החשמל הממוצע, המקסימלי והמינימלי בשעות הלילה בשנים 2025-2050



בעבודה זו ניתן לפתרון אנליטי ותורם לספרות האקדמית בשני תחומים עיקריים: (א) המודל מחשב את שיווי המשקל המיטבי במשק חשמל תחרותי כאשר ייצור החשמל על ידי PV הוא פונקציה של רמת הקרינה של השמש. (ב) המודל מאפשר לחשב את הפתרון המיטבי גם בעת תקופת מעבר ממשק חשמל ריכוזי שבו קיבולת ייצור החשמל גבוהה למשק חשמל תחרותי שהקיבולת המיטבית בו נמוכה יותר.

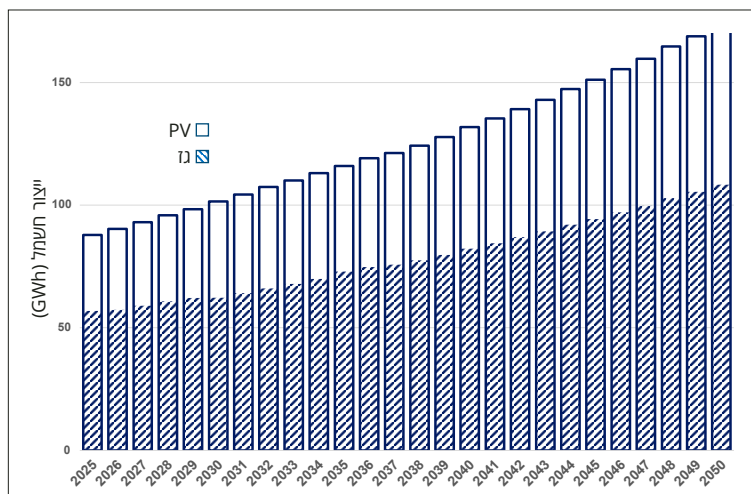
תוצאות המודל מראות שלאורך כל התקופה שאנו בוחנים, 2025-2050, יהיה צורך לבנות תוספת של קיבולת PV כמעט בכל שנה, בעוד שבנייה חדשה של קיבולת גז תחל רק בשנת 2038, ואז תימשך באופן מונוטוני בכל שנה עד

בתחום החשמל בישראל. תופעה זו תהיה פחות חמורה אם עלות הקיבולת של טכנולוגיית ה-PV תמשיך לרדת ותהיה נמוכה מ-\$35,040 ל-MW/year.

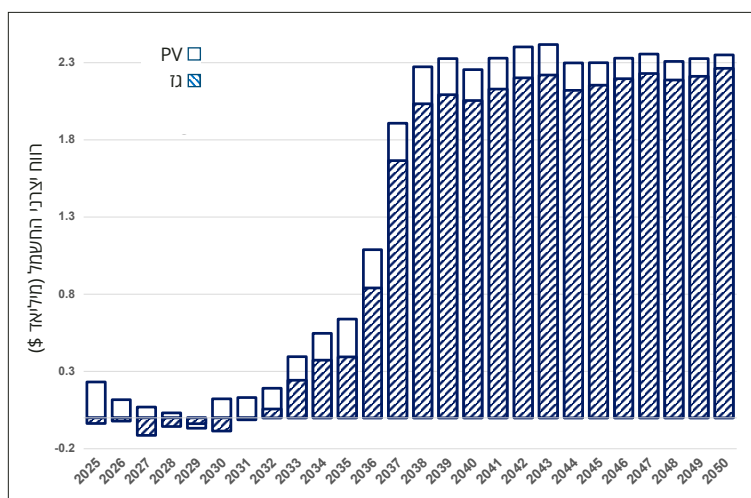
סיכום ומסקנות

עבודה זו מציגה את הקיבולת המותקנת, הייצור ומחירי החשמל המיטביים בתרחיש של התפתחות משק חשמל תחרותי בישראל בשנים 2025-2050. פתרון תרחיש זה נעשה עבור שתי טכנולוגיות ייצור בלבד, PV וגז, שגם היום הן טכנולוגיות ייצור החשמל העיקריות בישראל. המודל שבו השתמשנו

איור 5: סך ייצור החשמל השנתי (GWh) לפי טכנולוגיות ייצור בשנים 2025–2050



איור 6: רווחי יצרני החשמל לפי טכנולוגיות הייצור (מיליארד דולר) בשנים 2025–2050



שהיום, כאשר רוב החשמל בישראל מיוצר על ידי טכנולוגיות קונבנציונליות (גז ופחם), מחיר החשמל בלילה נמוך יותר ממחירו ביום מאחר שהביקוש לחשמל בלילה נמוך מהביקוש לו בשעות היום.

הצריכה של חשמל בישראל במשך שמתל תחרותי (כמו גם במשך חשמל ריכוזי) תעלה באופן מתון, בקצב של כ-3% לשנה, לאורך כל תקופת התכנון. למעלה מ-50% מייצור החשמל יבוא משימוש בטכנולוגיית הגז הטבעי, היחידה הניתנת כיום (ובעתיד הקרוב) לשימוש במשך הלילה. עוד חשוב לציין שקיבולת הגז הטבעי, שעיקר השימוש בה הוא במשך שעות הלילה, מהווה חרבה לייצור חשמל בימים עם

2050. ייצור החשמל במשך היום יעשה בעיקר על ידי טכנולוגיית ה-PV, שעלות בנייתה נמוכה מזו של טכנולוגיית הגז ועלות השימוש בה היא אפסית, וכתוצאה מכך נחזה לאורך זמן בירידה רצופה במחירי חשמל במשך שעות היום, ממוצע של כ-\$50 ל-MWh עם תחילת הפעלת השוק התחרותי (בהתאם להנחות העבודה – בשנת 2025) לכ-\$30 בשנת 2050. לעומת זאת, מחיר החשמל הממוצע בשעות הלילה (\$80-\$100 במשך 2025-2050) יהיה גבוה בהרבה ממחירו ביום מאחר שהעלות המשתנה של הגז הטבעי היא מהותית וסביר שתישאר ברמה דומה גם בעתיד.¹⁵ חשוב לציין

15 מחיר החשמל בלילה יהיה פחות גבוה מזה המחושב בעבודה זו כאשר אגירת חשמל תהיה כדאית ונרחבת.

עננות משמעותית כאשר תפוקת קיבולת ה-PV היא נמוכה (או אפס).

כאן גם המקום להוסיף שבשנים האחרונות חל תהליך של ירידה במחירי סוללות (בעיקר סוללות תעשייתיות גדולות) בקצב הולך וגובר (Newbery, 2016), ואם הוא יימשך בהתאם לתחזיות ויביא לכך שהשימוש בהן לאספקה משמעותית של חשמל יהיה כדאי, סביר מאוד שנחזה בעלייה משמעותית בקיבולת ה-PV לשימוש מיידית על ידי הצרכנים ולטעינת סוללות שבהן ישתמשו לאספקת חשמל בשעות הלילה. במקביל תהיה ירידה בקיבולת ובשימוש בטכנולוגיית הגז במשך שעות הלילה. לכן יש חשיבות רבה להכללת סוללות במודל של שוק חשמל תחרותי כאשר הירידה במחיר הסוללות תהיה משמעותית.

השלכות המדיניות העיקריות הנובעות מתוצאות עבודה זו הן כדלקמן. ראשית, תהליך המעבר ממשק ריכוזי למשק תחרותי יגרום לעודף משמעותי בקיבולת הגז במשך למעלה

מעשור, ולהפסדים או לרווחים נמוכים מאוד ליצרני החשמל המשתמשים בגז טבעי במשך תקופה זו. רשות החשמל בישראל צריכה לשקול אם ואיך ניתן לפצות יצרנים אלה במשך התקופה הנ"ל (ראו לדוגמה, Woo et al., 2003). שנית, אם מספר יצרני החשמל המשתמשים בטכנולוגיית PV יהיה גדול מאוד, הרווחים של יצרנים אלה עלולים להיות שליליים. כדי להימנע מתוצאה זו, על רשות החשמל לשקול מהו מספר יצרני חשמל על ידי PV הרצוי למשק החשמל הישראלי. לבסוף, אין ספק שבעתיד הלא רחוק חלק הייצור של חשמל על ידי PV יהיה גדול מאוד. על משרד האנרגיה לתכנן מראש כיצד אמור משק החשמל הישראלי להיות מפוקח כדי למנוע אי אספקת חשמל ו/או מחירי חשמל גבוהים מאוד (price spikes) בתקופות שבהן תהיה עננות ממושכת שתפחית באופן משמעותי את יעילות ייצור החשמל על ידי PV.

ashert@tauex.tau.ac.il

פרופ' אשר טישלר

רשימת מקורות

- Israel Public Utility Authority (PUA) – Electricity (2019). The State of the Israeli electricity sector report in 2018. <https://www.gov.il/he/Departments/General/dochmeshek> [accessed on July 2, 2021].
- Israel Public Utility Authority (PUA) – Electricity (2020). The State of the Israeli electricity sector report in 2019. <https://www.gov.il/he/Departments/General/dochmeshek> [accessed on July 2, 2021].
- Levin, N., Tishler, A. and Zahavi, J. (1983). Time step vs. dynamic optimization of generation-capacity-expansion programs of power systems. *Operations Research* 31(5), 891-914.
- Jacobson, M.Z., Delucchi, M.A., Bauer, Z.A.F., Goodman, S.C., Chapman, W.E., Cameron, M.A., Bozonnat, C., Chobadi, L., Clonts, H.A., Enevoldsen, P., Erwin, J.R. Fobi, S.N., Goldstrom, O.K., Hennessy, E.M., Liu, J., Lo, J., Meyer, C.B., Morris, S.B., Moy, K.R., O'Neill, P.L., Petkov, I., Redfern, S., Schucker, R., Sontag, M.A., Wang, J., Weiner E. and Yachanin A.S. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world. *Joule* 1, 108-121.
- Milstein, I. and Tishler, A. (2012). The inevitability of capacity underinvestment in competitive electricity markets. *Energy Economics* 34(1), 62-77.
- Milstein, I. and Tishler, A. (2015). Can price volatility enhance market power? The case of renewable technologies in competitive electricity markets. *Resource and Energy Economics* 41, 70-90.
- Milstein, I. and Tishler, A. (2019). On the effects of capacity payments in competitive electricity markets: Capacity adequacy, price cap, and reliability. *Energy Policy* 129, 370-385.
- מתן שחק (2020), אנרגיה מתחדשת בישראל רקע וסוגיות לדיון, מרכז המחקר והמידע, הכנסת.
- Chao, H. and Wilson, R. (2020). Coordination of electricity transmission and generation investments. *Energy Economics* 86, 104623.
- Cramton, P. (2017). Electricity market design. *Oxford Review of Economic Policy* 33(4), 589-612.
- Elliston B., MacGill I. and Diesendorf, M. (2013). Least cost 100% renewable electricity scenarios in the Australian national electricity market. *Energy Policy* 59, 270-282.
- Energy Ministry (2018). https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/hivatzut_sar_2018 [accessed on July 2, 2021].
- Gallo, L. (2017). A long term forecast of electricity demand in Israel. Bank of Israel, Research Department, Discussion Paper 2017.13.
- Green R. and Staffell, I. (2016). Electricity in Europe: Exiting fossil fuels? *Oxford Review of Economics Policy* 32, 282-301.
- Helm D. (2016). The future of fossil fuels – is it the end? *Oxford Review of Economics Policy* 32, 191-205.
- IEA (2018). World Energy Outlook 2018. www.iea.org/weo2018/fuels/#renewables.
- Israel Public Utility Authority (PUA) – Electricity (2018). A roadmap for the development of the generation segment in Israel's electricity sector: 2018-2030 (Hebrew), https://www.gov.il/he/departments/general/mapat_derech [accessed on July 3, 2021].

Milstein, I. and Tishler, A. (2021). Optimal capacity, production and prices in competitive electricity markets when electricity generation by the PV capacity depends on the sun's radiation. Working paper.

Newbery, D. (2016). A simple introduction to the economics of storage: Shifting demand and supply over time and space. EPRG WP 1626, <http://www.eprg.group.cam.ac.uk/wp-content/uploads/2016/10/1626-Text.pdf>.

Newbery, D., Pollitt, M.G., Ritz, R.A., and Strielkowski, W. (2018). Market design for a high-renewables European electricity system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, 695-707.

Tishler, A., Milstein, I. and Woo, C.K. (2008). Capacity commitment and price volatility in a competitive electricity market. *Energy Economics* 30, 1625-1647.

Traber T. (2017). Capacity remuneration mechanisms for reliability in the integrated European electricity market: Effects on welfare and distribution through 2023. *Utilities Policy* 46, 1-14.

Zarnikau, J., Woo, C.K., S. Zhu and C.H. Tsai (2019). Market price behavior of wholesale electricity products: Texas. *Energy Policy* 125, 418-428.

Woo, C.K., Lloyd, D., Karimov, R., and Tishler, A. (2003). Stranded cost recovery in electricity market reforms in the US. *Energy* 28, 1-14.

Place and Creative Organizations: Comparative Case Study of Three Dance-Theater Troupes



Tamar Sagiv, Odeya Pergament and Efrat Yonas

This paper studies the influence of the “location” on the management of creative organizations. We draw on the case of three established Israeli dance-theater groups that moved their entire operations and activities from the institutional metropolitan center of dance to the periphery, which is traditionally seen as a poor environment. The qualitative methodology indicates the emergence of a new spatial paradigm of aesthetic consumption: The cultural entrepreneurs interpret their own version of the environment, rather than merely reacting to it, in order to create conditions that allow redefinition and reconstruction. The renewed businesses are the commodification of non-material and aesthetic values.

Capacity, Production and Prices in Competitive Electricity Market in Israel: 2025-2050



Vladimir Gurevitz, Asher Tishler, Irena Milstein, Jacob Newman and Shimon Frant

This study applies a two-stage model to project capacity, production and prices in the competitive electricity market in Israel during 2025-2050. We employ two generating technologies – natural gas and photovoltaic cells (PV). Electricity generation by PV capacity varies over the day as a function of the sun's radiation. We compute the optimal solution (capacity, quantities and prices) during the interim period of moving away from the current centralized electricity market towards a competitive one and, later on, when the market becomes fully competitive. In contrast to the current situation, electricity prices during the day-hours will be significantly lower than those during the night-hours. In addition, average electricity prices will not change much during the night-hours but will decline considerably during the day-hours during 2025-2050. Electricity production by the PV technology will be about 40% of overall electricity production in 2050.

The Impact of Environmental Fraud on the Used Car Market: Evidence from Dieselpgate



Itai Ater and Nir S. Yoseph

This study explores the effects of Volkswagen's 2015 emissions scandal on the used car market in Israel. Using a difference-in-differences research design and administrative and proprietary data, we find that after Dieselpgate the number of transactions involving VW manipulated cars dropped by 18%, and the resale price of these cars fell by 6%. We find that the drop in the number of transactions was concentrated among private sellers, which suggests that the supply of vehicles depends on the seller type. We discuss alternative explanations for our findings and their relevance to green-vehicle policies.

The effect of Internal and External Supervision Authorities on the Information Value of Disclosures



Neta Gilat

In this paper, we introduce a model of earnings management in the presence of an internal monitoring entity, and show that there exists a unique equilibrium. We show that from an information viewpoint, an increase in the required level of internal supervision may surprisingly harm disclosure quality. We also show that while external penalties for earnings manipulation attempts increase the information value of disclosure, internal penalties decrease it. This implies that when increasing the required level of internal supervision, and internal penalties, one should consider the potential harm it may have on the information value of reported earnings.

Who Donates More – Rich in Heart or Rich in Pocket? The Relationship between Objective and Subjective Wealth on Donation-giving



Danit Ein-Gar

This research presents new findings on the relationship between wealth and donation giving. While it is trivial to assume that those who have more – donate more, past research showed that this is not always the case. In this research I show how subjective perceptions of wealth interacts with objective wealth to influence charitable giving. Subjectively feeling wealthy encourages more charitable giving especially among objectively wealthier givers. I demonstrate this relationship in two experiments where I measure objective wealth and manipulate subjective wealth. These findings shed light on the importance of feeling rich in the decision to donate and show that this feeling can vary regardless of how rich one actually is. The implications of these findings to donation raising efforts are discussed.

Liquidity Crises in the Banking System



Michael Leshem and Sivan Frenkel

In a market-based economy, an important role of the financial system is to match lenders and borrowers. Banks serve as financial intermediaries by issuing short-term obligations (deposits) to fund longer-term investments (loans). This maturity mismatch makes them vulnerable to unexpected large withdrawals. In this paper we review the theoretical and empirical literature on bank stability. We first analyze the vulnerability of a single bank to panics and bank runs, and explain why runs are more likely to occur at times of economic slowdown. We discuss the role of short-term debt, such as repo, in bank runs, and explain its role in the 2008 financial crisis and, in particular, in the fall of “Lehmann Brothers”. Finally, we zoom-out and consider the banking system as a whole, and explain why liquidity crises tend to be correlated, and therefore pose a systemic risk.

Mind Wandering at Work: When Employee's Thoughts Wander Away from Their Tasks



Sharon Toker and Einat Yaor

Mind Wandering is a common mental state in which one's thoughts drift away from a task toward self-generated thoughts. In this paper we describe Mind Wandering and emphasize its impact in organizational settings. We describe three levels of classification of Mind Wandering, including amount of Mind Wandering, meta-cognition of Mind Wandering and the contents of Mind Wandering. Mind Wandering affects performance in various tasks, including tasks that are central in many jobs such as monitoring tasks, verbal information processing tasks and creative tasks. Research shows that the amount of Mind Wandering affects performance in these tasks. Presenting the classification levels enables us to expand these findings and examine the effects of meta-cognition and content of Mind Wandering on performance in these tasks. Additionally, we suggest that Mind Wandering may play a role in temporary recovery from stressful tasks.

Unions, CEO Compensation and Income Inequality



Vered Zingher and Ishak Saporta

Income inequality has grown in the last few decades in many western countries, especially in the United States. Consequently, governments have started regulating, monitoring and even setting restrictions on executives' pay, including requiring reporting on executives' compensation in the companies' financial statements, restrictions on tax-deductions, voting on the remuneration levels through Say-On-Pay mechanisms, etc. In this paper, we review the changes that have taken place in wage inequality in recent decades, the trends that have changed in executive pay, and the effects of labor unions on the labor market. In addition, we examine the relationship between the unions and executives' compensation in Israel and the effect of unions on the important relationship between executives' compensation and company performance. It is possible that the restraint of inequality will come from the unions and not only from the wage restrictions in legislation and regulation.

Me, Myself and I: The Cognitive Cost of Video Chatting on Zoom



Natalia Kononov and Orly Bareket

With the imposition of social distance constraints due to COVID-19, entire areas of life ceased to exist face-to-face, moving at once into the virtual video space. The main advantage of video calls is that they include a quality visual dimension and therefore seem to be a worthy substitute for face-to-face interactions. However, unlike the experience of a routine face-to-face meeting, the virtual experience in zoom conversations is characterized by a constant reflection of the self across the screen that exposes the speaker to constant feedback about his or her appearance and behavior, as well as the way he or she is viewed from others' perspectives. We propose that while in face-to-face conversations we are required to allocate attentional resources to processing information that mainly concerns the other speaker and the conversation, in a virtual conversation in Zoom we are also forced to process information about ourselves, an experience that may be both unpleasant and cognitively demanding.

Managers have the Influence and Ability to Increase the Level of Agility in Organizations



Yossi Yitshaki and Abraham Carmeli

One of the significant challenges with which organizations and their managers cope with a high level of uncertainty, dynamism, complexity and volatility concerns the design and build of an agile organizational system ("agile organization") that has the flexibility needed to deal with and adapt to these conditions quickly. In this article, we first discuss the concept of agility – the ability to adapt and respond quickly and flexibly to change. In order to illustrate organizational agility, we expand on agile methodologies, which are attracting growing interest in the business world, particularly in research and development (R&D) organizations. Next, we focus on ways whereby managers can increase the level of agility in their organizations. We suggest that managers can help in designing and building an agile organizational system by cultivating three key elements: functional diversity, psychological safety, and empowerment. Finally, we specify managerial practices conducive to promoting such an agile organizational system.

Practical Tools for Effective Management of Virtual Negotiations



Hilla Dotan

In the current epidemic era, most of us have been forced to move many of our negotiations online. Many negotiators are still trying to use the known strategies and simply move them virtually; however, virtual negotiations require very different strategies, preparation and application. In this paper I review the four types of virtual platforms that exist, highlighting the advantages and disadvantages of each given the purpose of the negotiation. I then discuss the importance of preparing an effective virtual negotiation process that not only focuses on maximizing our interests but attempts to build effective relationships. To further illustrate this point, I focus on one type of virtual platform – video-conferencing. Using examples and a practical “check-list”, I demonstrate how one can prepare and implement such a relationship building process. Moreover, I offer a framework to manage emotions and conflicts in virtual negotiations. In today’s ever changing economic markets, knowing how to conduct effective virtual negotiations may become one’s competitive advantage.

Are Online Public Shamers Vicious or Caring? Moral Considerations in Online Public Shaming



Chen Pundak

What causes people to participate in online public shaming campaigns against alleged wrongdoers? Such decisions may create an ethical dilemma, because while online public shaming can diminish wrongdoing, it can also cause harm by violating wrongdoers’ privacy. In this paper we suggest an individual’s moral compass, the drive to distinguish right from wrong, shapes the participation decision. A set of studies show that individuals with a strong moral compass are more likely to participate in online public shaming campaigns than those with a weak moral compass, but only when the wrongdoer’s identifiability is low. Notably, the effect is attenuated when multiple individuals are targeted for shaming, rather than a single wrong doer.

- E4 **Hilla Dotan**
Practical Tools for Effective Management of Virtual Negotiations
- E4 **Chen Pundak**
Are Online Public Shamers Vicious or Caring? Moral Considerations in Online Public Shaming
- E5 **Natalia Kononov and Orly Bareket**
Me, Myself and I: The Cognitive Cost of Video Chatting on Zoom
- E5 **Yossi Yitshaki and Abraham Carmeli**
Managers have the Influence and Ability to Increase the Level of Agility in Organizations
- E6 **Sharon Toker and Einat Yaor**
Mind Wandering at Work: When Employee's Thoughts Wander Away from Their Tasks
- E6 **Vered Zingher and Ishak Saporta**
Unions, CEO Compensation and Income Inequality
- E7 **Danit Ein-Gar**
Who Donates More – Rich in Heart or Rich in Pocket? The Relationship between Objective and Subjective Wealth on Donation-giving
- E7 **Michael Leshem and Sivan Frenkel**
Liquidity Crises in the Banking System
- E8 **Itai Ater and Nir S. Yoseph**
The Impact of Environmental Fraud on the Used Car Market: Evidence from Dieselgate
- E8 **Neta Gilat**
The effect of Internal and External Supervision Authorities on the Information Value of Disclosures
- E9 **Tamar Sagiv, Odeya Pergament and Efrat Yonas**
Place and Creative Organizations: Comparative Case Study of Three Dance-Theater Troupes
- E9 **Vladimir Gurevitz, Asher Tishler, Irena Milstein, Jacob Newman and Shimon Frant**
Capacity, Production and Prices in Competitive Electricity Market in Israel: 2025-2050

A Word from the Editor



Moshe Zviran

The Collier School of Management takes pleasure in presenting the 10th issue of *Innovations in Management*, the School's academic journal, which, with its trends, innovations and cutting edge research results in management, serves as a bridge connecting academic research with the world of practice with the aim of leading a dialog on developments in the world of management.

The current issue contains 12 papers that have undergone anonymous peer review, as practiced by the leading academic journals in the world.

- The opening paper, by Dr. Hilla Dotan, deals with practical tools for effectively managing virtual negotiations. In it she reviews the types of relevant platforms for managing virtual negotiations, proposing a framework for the effective management of such negotiations to maximize the interests of the parties and at the same time build long-term partnerships.
- The second paper, by Dr. Chen Pundak, which focuses on understanding ethical behavior in the digital world, discusses the repercussions of shaming in social media, demonstrating that the moral compass of the individual determines the decision on whether to join in the shaming.
- In the third paper, Natalia Kononov and Dr. Orly Bareket discuss the cognitive price of Zoom conversations, presenting findings on the relationship between the constant viewing of oneself during the course of the Zoom conversation and the level of attention and feelings of tiredness.
- The fourth paper was written by Yossi Yitshaki and Prof. Abraham Carmeli who discuss the agility of organizations – the ability to adapt and respond quickly and flexibly to change. The authors review agile methodologies that are gaining much interest in the business world, focusing on ways of increasing organizational agility.
- The fifth paper, by Prof. Sharon Toker and Dr. Einat Yaor, deals with the phenomenon of mind wandering at work from the task at hand to self-generated thoughts. It examines the repercussions of the phenomenon on performance in a range of tasks.
- The sixth paper presents the results of a study by Vered Zingher and Dr. Ishak Saporta on the relationship between unionization of workers and the pay of senior executives in Israel. It examines the influence of unionization on the relationship between the pay of senior executives and firm performance.
- In the seventh paper, Prof. Danit Ein-Gar presents new findings on the relationship between wealth and donation giving, indicating how subjective perceptions of wealth are related to objective wealth. She discusses the practical implications of the findings for the success of fund raising processes.
- The eighth paper, by Michael Leshem and Dr. Sivan Frenkel, deals with the stability of banks, showing why bank crises tend to be correlated, which lead to the danger of the entire financial system collapsing.
- The paper by Prof. Itai Ater and Nir Yoseph investigates the influence of exposing fraudulent emissions pollution results for diesel vehicles manufactured by the Volkswagen Group in the 2015 scandal (known as Dieselgate) on the used car market in Israel.
- The paper by Dr. Neta Gilat examines how increasing the supervision of financial reporting affects the value of the information reported by the company. It presents the repercussion of penalties imposed by an internal or external supervising authority on managers caught manipulating the reports.
- The paper by Dr. Tamar Sagiv, Odeya Pergament and Efrat Yonas examines the effect of geographical location on the management of cultural and artistic organizations through three case studies of dance-theater troupes that relocated from the center of the country to the periphery.
- The paper by Prof. Asher Tishler and his co-authors winds up the issue. It deals with the estimation of the capacity, the production and the prices of electricity in a scenario of the Israeli electricity market forecasted for 2025-2050.

On behalf of my colleagues on the editorial board, I would like to thank all the authors for their important contribution to the journal. Special thanks are due to the reviewers of the papers for volunteering their time to make this issue more professional and the papers more focused and readable. Our thanks are also due to Prof. Sharon Toker for her wonderful illustrations, and to Liat Hoshea for working so effectively and efficiently to produce this issue.

With all good wishes,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Zviran', written in a cursive style.

Prof. Moshe Zviran

Editor-in-Chief

Innovations in Management

Journal of the Coller School of Management

Issue 10, February 2022

Editors-in-chief

Prof. Moshe Zviran

Prof. Dan Amiram

Associate Editors

Prof. Nisan Langberg

Prof. Gal Oestreicher-Singer

Prof. Yael Steinhart

Dr. Carmit Tadmor

Editorial Board

Prof. Itai Ater

Prof. Eli Amir

Prof. Yossi Aviv

Prof. Danny Ben-Shahar

Prof. Jacob Glazer

Dr. Jacob Oded

Prof. Orly Yehekel

Copy Editor

Udi Levinger

Copy Editor – English

Gerda Kessler

Illustrations

Prof. Sharon Toker

Graphic Design & Editing

Michal Semo Kovetz

Printing

Copy Center

Editorial Address

Coller School of Management

Tel Aviv University

Ramat Aviv, Tel Aviv 6997801

Tel: 03-6408720, Fax: 03-6409983

Email: hidushim@tauex.tau.ac.il

Innovations in Management

Hilla Dotan

Practical Tools for Effective Management of Virtual Negotiations

E4

Chen Pundak

Are Online Public Shamers Vicious or Caring? Moral Considerations in Online Public Shaming

E4

Natalia Kononov and Orly Bareket

Me, Myself and I: The Cognitive Cost of Video Chatting on Zoom

E5

Yossi Yitshaki and Abraham Carmeli

Managers have the Influence and Ability to Increase the Level of Agility in Organizations

E5

Sharon Toker and Einat Yaor

Mind Wandering at Work: When Employee's Thoughts Wander Away from Their Tasks

E6

Vered Zingher and Ishak Saporta

Unions, CEO Compensation and Income Inequality

E6

Danit Ein-Gar

Who Donates More – Rich in Heart or Rich in Pocket? The Relationship between Objective and Subjective Wealth on Donation-giving

E7

Michael Leshem and Sivan Frenkel

Liquidity Crises in the Banking System

E7

Itai Ater and Nir S. Yoseph

The Impact of Environmental Fraud on the Used Car Market: Evidence from Dieselgate

E8

Neta Gilat

The effect of Internal and External Supervision Authorities on the Information Value of Disclosures

E8

Tamar Sagiv, Odeya Pergament and Efrat Yonas

Place and Creative Organizations: Comparative Case Study of Three Dance-Theater Troupes

E9

Vladimir Gurevitz, Asher Tishler, Irena Milstein, Jacob Newman and Shimon Frant

Capacity, Production and Prices in Competitive Electricity Market in Israel: 2025-2050

E9

