

## תכנון מדיניות על בסיס תרחישים כמותניים לצורך קבלת החלטות בתנאי אי-ודאות עמוקה

שמואל אברמזון<sup>1</sup>

מאמר זה סוקר את מתודולוגיית קבלת ההחלטות העמידות ( Robust Decision Making), שפותחה לצורך התמודדות עם קבלת החלטות מדיניות בתנאי אי-ודאות עמוקה. השיטה מבוססת על בניית סדרה מגוונת של תרחישים ובחינה שיטתית של צעדי מדיניות אפשריים לנוכח כל אחד מהם. באמצעות ניתוח כמותני, המבוסס על תוכנות מחשב מתקדמות, המתודולוגיה מאפשרת למקבל ההחלטות להיחשף לחזקות, לחולשות ולמידת הרגישות של צעדי המדיניות לנוכח אירועים עתידיים ולזהות את אלה המשיגים תוצאות טובות בסדרה רחבה של תרחישים. המאמר ממחיש את השימוש במתודולוגיה בישראל ובארצות הברית באמצעות שלושה מקרי בוחן: תכנון אסטרטגי בתחום האנרגיה, ניהול חוב ממשלתי והשקעות בשדרוג נמל ימי.

**מילות מפתח:** אי-ודאות, קבלת החלטות, תכנון מדיניות, תרחישים, עמידות, ניתוח כמותני

### רקע

בשנים האחרונות השתרשה, אף יותר מבעבר, ההכרה שהמציאות הנחקרת בתחומי החברה והכלכלה מתאפיינת במורכבות רבה ובאי-ודאות קיצונית, ולכן היכולת לחזות תהליכים עתידיים מוגבלת ביותר. הכרה זו נוגעת למעשה לחלק גדול מהסוגיות המגיעות לפתחם של קובעי המדיניות בתחום החברתי-הכלכלי, הנאלצים לפעול בתנאי האי-ודאות העמוקה המאפיינת בין היתר את הגיאופוליטיקה, את הדמוגרפיה, את הכלכלה ואת העולם הפיננסי.

1 המועצה הלאומית לכלכלה, משרד ראש הממשלה.

להבנה זו תרמו אירועים דרמטיים שהתחוללו בשנים האחרונות אחרי תקופה של רגיעה יחסית, ובהם המשבר הכלכלי העולמי, שינויים טכנולוגיים מרחיקי לכת ואירועים גיאופוליטיים מפתיעים. כל אלה יצרו עניין מחודש בספרות ובמחקר המדעי העוסקים באי-ודאות הנוגעת למדיניות הציבורית. מגמה זו גם משקפת תגובת נגד לכלים ולמודלים כמותניים שפותחו ואומצו בעשורים האחרונים ושנועדו לתאר את המציאות ולחזות את העתיד, אך לא באמת מצליחים; למרות ליקוייהם של אלה, הם שימשו, ועדיין משמשים, בהיקף רחב בתהליכי קבלת החלטות מדיניות, במיוחד בתחומי הכלכלה (ראו Makridakis & Manski, 2013; Taleb, 2009).

מטרת מאמר זה היא לסקור ולהציג לפני הקורא הישראלי מספר דוגמאות לדרך שבה מתודולוגיה כמותנית המבוססת על תוכנות מחשב מתקדמות משמשת בתכנון מדיניות המבוסס על תרחישים כדי לקבל החלטות בתנאי אי-ודאות עמוקה. במאמר מוצגים בקצרה את מאפייני האי-ודאות שמקבל ההחלטות עשוי להתמודד עמם, אציג את עיקרי גישת תכנון המדיניות המבוססת על תרחישים, ארחיב על גישת **קבלת ההחלטות העמידות** (Robust Decision Making) ואציג מספר דוגמאות להמחשת ניתוח מסוג זה.

## אי-ודאות עמוקה

קבלת החלטות, לְכַטַח בתנאי אי-ודאות, דורשת גישה מתודולוגית סדורה. תחילה נדרש להבהיר את מאפייני האי-ודאות שמקבל ההחלטות ניצב לפניהם, משום שמאפיינים שונים יתוו גישות שונות של קבלת ההחלטות.

יש הבחנה מקובלת בין שני סוגי אי-ודאות מרכזיים, הנשענת על מושגים שטבע נייט (Knight, 1921). אי ודאות רגילה – "סיכון" (risk) על פי נייט – פירושה שניתן לאפיין לפי הסתברות את המצבים האפשריים של העולם. במקרים אלה נהוג להשתמש בעקרונות החלטה כלכליים של מקסום תוחלות התועלת לאור חלופות המדיניות המצויות. אבל לא תמיד ניתן לייחס הסתברות למצבי העולם ולגורמים שיוצרים אותם. כאשר העתידים האפשריים עדיין ידועים אך לא ניתן לאפיינם לפי הסתברות, נדרשת גישה אחרת, שתאפשר לקחת בכל זאת בחשבון את המידע המצוי בסדרה זו של עתידים אפשריים. מצבים אלה זכו להגדרות "אי-ודאות עמוקה" (deep uncertainty), "אי-ודאות חמורה" (severe uncertainty), "עמימות" (ambiguity) או פשוט "אי-ודאות נייטיאנית" (Knightian uncertainty).

במאמר זה התמקדתי בקבלת החלטות במצבים מובהקים של אי-ודאות עמוקה או עמימות, לפי הבחנתו של נייט. לא התייחסתי למצבי ביניים של אי-ודאות הנמצאת על הרצף בין

הקצוות שהתווה נייט,<sup>2</sup> ולא למצבי אי-ודאות קיצוניים יותר, שבהם לא ניתן להבין אף את מרחב מצבי העולם האפשריים ואת מקורות האי-ודאות, לא כל שכן את ההסתברות להם.<sup>3</sup>

## גישת תכנון המבוססת על תרחישים (Scenario-Based Planning)

המענים המרכזיים המקובלים כיום לאתגר של אי-ודאות עמוקה – אחד מהם ייסקר לעומק במאמר זה – מבוססים רובם על גישת ניתוח התרחישים (Scenario Analysis). גישה זו מתמקדת באפיון תרחישי עתיד אפשריים לצורך קבלת החלטות בהווה ולאורך זמן, אך היא נמנעת מלחזות את העתיד באופן הסתברותי או מהימרה להגיע לחיזוי מדויק. התפתחות יכולות המחשוב והניתוח המתמטי בשנים האחרונות סימנה קפיצת דרך של מתודולוגיות ניתוח התרחישים, כשהרחיבה את בסיס הנתונים הכמותניים העומד לרשותן והרחיבה את היקף הניתוח שלהן ואת עומקן.

השימוש בתרחישים לניתוח מדיניות בתנאי אי-ודאות איננו חדש. הוא התגבש בהקשר הצבאי לאחר מלחמת העולם השנייה וסביב המלחמה הקרה, ולאחר מכן אומץ בהדרגה בתחומי הכלכלה, הסביבה והחברה, התכנון וניהול המשאבים. דוגמאות בולטות מצויות כיום בתחום מדיניות הסביבה והאנרגיה, שם שוררת אי-ודאות רבה, בפרט באשר למאפיינים של תופעת שינוי האקלים בעתיד ולהשלכות הנגזרות ממנה (ראו Leggett, et al., 1992). גם בישראל יש היסטוריה של שימוש בתרחישי מדיניות, במיוחד בתחום הביטחוני, אך גם בתחומים הנוגעים לתכנון גיאוגרפי סביבתי (ראו למשל <http://www.kayamut2030>). לתכנון מערכות מים, לתחבורה (Shiftan, Kaplan, & Hakkert, 2003), לדת והכרה (חסון, 2002), ליחסי יהודים וערבים (Hasson & Abu-Asbah, 2004) וליחסים גיאופוליטיים (חסון ועמיתים, 2011).

ברוב המקרים גישת ניתוח התרחישים נמנעת מהגדרת הסתברות מדויקת של אותם תרחישי עתיד אפשריים, ולכן נהוג לכנותה לעתים גישה **דטרמיניסטית**, כלומר כזאת המתארת אותם באופן סופי ומוחלט. הגישה **ההסתברותית** (או סטוכסטית), לעומתה, מנסה לייצר מנעד רחב

2 בספרות המתמטית התפתח גם תיאור של מצבי ביניים בין הקצוות שהתווה נייט, שבהם יש מידע הסתברותי חלקי או לא חד-משמעי על מצבי העולם. Fuzzy Logic שפיתח זדה (Zadeh, 1988) מציע ממד של "חברות" (membership) לכל מצב עולם שמבטא תיאור של מידת התאמתו לקטגוריה מסוימת. תיאוריות של Imprecise Probabilistic Information ושל Probabilistic-Boxes מדברות גם הן על מידע הסתברותי לא חד-משמעי (להרחבה ראו Ferson, 2002; Bradley, 2016).

3 מציבים קיצוניים אלה, שאין בהם הבנה של מרחב מצבי העולם האפשריים, זוכים לכינויים שונים בספרות, ובהם "כאוס", "סביבה מורכבת", "הדומיין הרביעי" ו"בעיה נבזית" (ראו Head & Alford, 2015; Kurtz & Snowden, 2003; Taleb, 2009).

של תרחישי עתיד ולהתאים התפלגות הסתברותית להתרחשותם. אם כן, גישת התרחישים מתאימה לתכנון מדיניות במצב של אי-ודאות עמוקה, כפי שתואר במבוא, כלומר מצב שבו לא ניתן לקבוע או לחזות את הערכים של המשתנים הקובעים את העתיד או את הסתברותם. ואולם בכל זאת ניתן לדעת את טווח הערכים **האפשריים** של אותם משתנים, ולפיכך לייצר קבוצה סופית של תרחישים אפשריים. יחד עם זאת, אין מניעה שתרחישים דטרמיניסטיים יתבססו בחלקם גם על משתנים הסתברותיים, אם ההסתברות של חלק מהגורמים המניעים אותם (אך לא כולם) ידועה. במקרה זה עדיין מדובר בתרחיש שהסתברותו הכוללת לא ידועה. כלי ניתוח הסתברותיים (כמו ניתוח תוחלת תועלת) עדיין עשויים לשמש בקבלת החלטות בעניינים שהאי-ודאות בנוגע אליהם רגילה.

ניתן להבחין גם באופן גס בין תרחישים איכותניים או כמותניים במהותם. **תרחיש איכותני** הוא כזה המציג סיפור (מכונה לעתים נרטיב) עשיר יחסית בפרטים, העשויים לסייע למקבל ההחלטות להבין את העתיד האפשרי. תרחישים מסוג זה נוהגים, למשל, בתחום הצבאי כדי לטוות סיפורי מלחמה אפשריים. **תרחיש כמותני**, לעומת זאת, ממוקד בעיקרו בהצגת נתונים מספריים על מאפייניו של העתיד האפשרי. שיטה מסוג זה מתאימה, למשל, כאשר מקבל ההחלטות נדרש להבין תוצאות כלכליות או דמוגרפיות מדויקות, ללא עניין מיוחד להבין לעומק את התהליכים האנושיים והחברתיים העומדים מאחוריהן. ברוב המקרים תרחיש כמותני דל מטבעו בפרטים בהשוואה לתרחיש האיכותני, ומציג נתונים המתמצתים תמונת מצב עשירה ומורכבת העומדת מאחוריהם. יחד עם זאת, המרכיבים הכמותיים של התרחישים הם כר לניתוחים מתמטיים המבוססים על מחשוב, וטמון בהם פוטנציאל נכבד של הפקת מידע הרלוונטי לקבלת החלטות.

חוקר מדיניות המעוניין לייצר ולבחון תרחישים רלוונטיים למקבל ההחלטות נדרש לענות על שתי שאלות מתודולוגיות מרכזיות העומדות בבסיס הניתוח הנדרש:

**כיצד לבנות ולבחור את התרחישים?** מכיוון שסדרת התרחישים העומדים לבחינה היא מוגבלת וסופית, חשוב לוודא שהם משקפים נאמנה את מגוון העתידים האפשריים. סוגיה קריטית היא בחירת מידת **הקיצוניות** של התרחישים הנבחרים, משום שהיא תעצב את מסקנות הניתוח.

**כיצד משתמשים בתרחישים האלה בקביעת מדיניות?** מנתח המדיניות יכול להשתמש במידע המצוי בתרחישים כדי להאיר את ההזדמנויות ואת האתגרים הניצבים לפני מקבל ההחלטות, ולהשתמש בכלי ניתוח שיטתיים ובקריטריונים לקבלת החלטות לאורם. מטבע הדברים תשפיע הבחירה בכלי הניתוח ובקריטריונים השפעה מכרעת על ההחלטות שיתקבלו.

## גישת קבלת ההחלטות העמידות (RDM) – מתודולוגיה המבוססת על מחשב לניתוח כמותני המבוסס על תרחישים

בעשרות השנים האחרונות נעשו מאמצים שונים לייצר מסגרות מתודולוגיות סדורות, כמותניות בעיקר, לשימוש בתרחישים. אחת הבולטות שבהן היא מתודולוגיית **קבלת ההחלטות העמידות** (Robust Decision Making; להלן RDM), שגיבשו וניסחו מספר חוקרים ממכון ראנד שבארצות הברית (Lempert, Popper, & Bankes, 2003). השיטה מזוהה כיום בעיקר עם המכון, אך קנתה אחיזה גם בקרב מומחים אחרים, בפרט באוניברסיטת דלפט בהולנד ובגופי מחקר ממשלתיים בארצות הברית.<sup>4</sup> מאמר זה יתבסס ברובו על מסגרת חשיבתית זו. גישה בולטת מקבילה להתמודדות עם אי-ודאות עמוקה היא Info-Gap שפיתח בן-חיים (Ben-Haim, 2006). נתייחס אליה בהמשך.

גישת RDM נשענת על יצירת מספר רב של תרחישים המייצגים מרחב אפשרויות מגוון ככל האפשר של עתידים **סבירים** (plausible futures). על בסיס תרחישים אלה, מנתח המדיניות נדרש לחפש ולעצב אסטרטגיות **עמידות** (robust strategies), כלומר כאלה המניבות תוצאות "טובות מספיק" כנגד סדרה רחבה מאוד של תרחישים. גישה זו גם מנסה לאפיין ולחשוף את המשתנים בעלי השפעה הגדולה ביותר על תוצאות המדיניות. בכך היא מאפשרת לקובע המדיניות להבין את חולשות המדיניות הנבחנת ואת חוזקותיה, ולשקול חלופות הנותנות מענה לסיכונים ולהזדמנויות העשויים להתממש.

כך ניתן לסכם את סדר הפעולות של ניתוח המבוסס על תרחישים על פי גישת RDM (יורחב בהמשך המאמר):

1. בונים מודל המקשר בין משתנים חיצוניים ופעולות מדיניות לבין תוצאות מצבי העולם העתידיים.
2. יוצרים סדרת תרחישים רחבה על בסיס טווח הערכים השונים של המשתנים הבלתי ודאיים וההנחות השונות האפשריות בבסיס המודל.
3. מזהים אסטרטגיות אפשריות (candidate strategies) שייבחנו לאור התרחישים השונים.
4. מזהים את קבוצות התרחישים שבהם האסטרטגיות חשופות לכישלון.

---

4 הרחבה על גופים העוסקים ביישום השיטה באתרים אלה: <http://www.deepuncertainty.org> ו-<https://www.rand.org/topics/robust-decision-making.html>.



2. **אסטרטגיות** – אלה הן פעולות מדיניות שונות שכל אחת מהן משפיעה אחרת על תמונת העתיד, ואשר מקבל ההחלטות מעוניין לבחון אותן לאור תרחישי עתיד אפשריים. לדוגמה: בהקשר של ניהול משק המים, מקבל ההחלטות יכול לבחור באסטרטגיות של השקעה בתשתיות מסוגים שונים, לשנות את דפוסי השאיבה או כל שילוב ביניהם.
  3. **מדדים** – אלה התוצאות שלאורך נמדדת הצלחת המערכת בעיניו של מקבל ההחלטות. לדוגמה: בהקשר של ניהול משק המים נרצה לדעת את מידת הזמינות (היצע) של המים, את היתירות של המערכת ואת עלות המים.
  4. **קשרים** – אלה הם החיבורים בין חלקי המודל: הם מסבירים כיצד משתני האי-ודאות בשילוב האסטרטגיות מניבים תוצאות שניתן לשפוט באמצעות המדדים. הקשרים עצמם מבוססים בחלקם על משתנים שאין אי ודאות בנוגע אליהם ובחלקם על משתנים המאופיינים באי-ודאות (ולכן נכללים גם במרכיב "משתני האי-ודאות"). בהקשר של ניהול משק המים קשרים הם, לדוגמה, תיאור האופן שבו כמות המשקעים, מדיניות השאיבה, התשתיות הקיימות מיתרגמים להיצע וזמינות המים לחקלאות.
- התוכן שיוצקים לתוך כל אחד מעמודי התווך הוא פרי החלטה של מנתח המדיניות, שיכול להיעזר בספרות וכידע קודמים או בהליכי היוועצות עם מומחים ומקבלי החלטות רלוונטיים, כדי להחליט על מרכיבי התוכן ועל מאפייניהם.
- באמצעות תוכנות המחשב מאפשר המודל להפיק סדרה רחבה של תוצאות תרחישי עתיד אפשריים, כל אחד מהם מבוסס על שילוב ערכים שונה של משתני האי-ודאות והאסטרטגיות המוזנים לתוך האלגוריתם שבבסיס המודל. כל עתיד אפשרי מתואר באמצעות המדדים הרלוונטיים. מקובל לדגום ערכים של משתנים המאופיינים באי-ודאות עמוקה בשיטת Latin Hypercube, המייצרת סדרה רחבה ומפוזרת היטב של צירופי ערכים אפשריים. במשתנים שהסתברותם ידועה ניתן לשלב שיטת דגימה מסוג מונטה-קרלו, המייצרת דגימה הלוקחת בחשבון את ההסתברויות של המשתנים.
- כשמסיימים להריץ את המודל, מתקבל מסד נתונים המתאר את תרחישי העתיד האפשריים, כמתואר בדוגמה בלוח 1. דוגמה זו מייצגת מערכת היפותטית הכוללת שתי אסטרטגיות אפשריות ושני משתני אי-ודאות שלכל אחד מהם שלושה ערכים אפשריים. הפלט מציג 18 (X3X32) תרחישים אפשריים, המתוארים באמצעות שילוב ערכים של שלושה מדדי תוצאה. להלן בפרק **קריטריונים לבהינת תרחישים** יובהר כיצד ניתן להשתמש במידע המתקבל ממסד נתונים זה.

לוח 1: דוגמה של פלט לבניית תרחישים כמותניים

ממד תוצאה 3	ממד תוצאה 2	ממד תוצאה 1	ערכי משתנה אי-ודאות 2	ערכי משתנה אי-ודאות 1	אסטרטגיה #	עמיד (תרחיש) # אפשרי
4836.1	286.1	65.6	100	10	1	1
3204.1	674.3	50.9	200	10	1	2
4631.0	985.5	83.6	300	10	1	3
772.4	674.1	68.0	100	20	1	4
6783.2	657.6	27.8	200	20	1	5
140.6	203.6	4.2	300	20	1	6
140.9	866.9	71.1	100	30	1	7
5116.5	828.8	23.0	200	30	1	8
6190.6	470.3	45.5	300	30	1	9
5842.6	7.6	74.7	100	10	2	10
5534.1	505.8	76.6	200	10	2	11
9939.6	164.2	13.3	300	10	2	12
8661.1	261.4	14.8	100	20	2	13
1600.8	470.1	67.2	200	20	2	14
8574.1	678.2	92.1	300	20	2	15
2944.8	844.4	54.4	100	30	2	16
3643.0	494.5	90.8	200	30	2	17
8376.8	992.8	92.0	300	30	2	18

### קריטריונים לבחינת תרחישים

מקבל ההחלטות נדרש לבחור את האסטרטגיה המועדפת לאור תמונת התרחישים העתידיים האפשריים, המתאפיינים באי-ודאות עמוקה. בניגוד למצב שבו מבססים את ההחלטה על תחזית ברורה או הסתברותית שלאורה ניתן לחפש תוצאה "מיטבית" (או בעלת תוחלת מיטבית כמקובל בניתוח כלכלי), כאן נדרש ניתוח אחר לפי הקריטריונים האלה (אף שאין הם הקריטריונים האפשריים היחידים):

1. **שליטה (dominance)** – אם תימצא אסטרטגיה אחת הנותנת תוצאות טובות מאלה של מתחרותיה בכל מצב עולם שהוא, היא תיבחר.



2. **Max-Min** – תיבחר האסטרטגיה שתוצאתה האפשרית השלילית ביותר שלילית פחות מהתוצאה השלילית של כל האסטרטגיות החלופיות.
3. **Min-Max Regret** – המושג regret (חרטה) בנוגע לאסטרטגיה מסוימת מבטא את הפער בין ביצועיה של אותה אסטרטגיה לבין הביצועים של אסטרטגיה חלופית שהייתה משיגה את התוצאה הטובה ביותר בתרחיש נתון. קריטריון Min-Max Regret קובע את בחירתה של אסטרטגיה שהחרטה המרבית על הבחירה בה נמוכה בעוצמתה מהחרטה המרבית על הבחירה בכל אחת מהאסטרטגיות החלופיות.
4. **עמידות (robustness)** – הספרות מציעה הגדרות שונות למושג זה; ברובן הגדול הן מדברות על השגת תוצאות סבירות בסדרה גדולה של תרחישים אפשריים. במקרים רבים מדובר למעשה בקריטריון סובייקטיבי – מקבל ההחלטות יכול לקבוע מה בעיניו היא סדרת תרחישים גדולה מספיק ומהו הסף הנדרש כדי לקבוע אם אסטרטגיה היא עמידה.

### ניתוחי מחשב המבוססים על תרחישים לזיהוי אסטרטגיות עמידות

אחד היתרונות הבולטים והחדשניים ביותר של שימוש ביכולות מחשוב לניתוח תרחישים הוא זמינות המידע הכמותי הרב הטמון בהם, המאפשרת לאסוף תובנות שיסייעו לבנות אסטרטגיות חדשות ומשופרות. תהליך זה של עיבוד נתוני התרחישים מכונה **חשיפת תרחישים** (Scenario Discovery). תוכנות המחשב יכולות לאפיין כמותית, באמצעות אלגוריתמים של כריית מידע (data mining), את המצבים העתידיים שבהם האסטרטגיות נכשלות ולהציף מידע שעשוי לסייע בגידור אותם מצבי כישלון אפשריים.<sup>7</sup>

כך לדוגמה הניתוח באמצעות מחשב יכול לסייע להבהיר אילו הם הערכים של משתני האי-ודאות שחלקם בכישלון אסטרטגיה מסוימת הוא הנכבד ביותר ובאילו רמות של ערכים אלה נוצר הכישלון. כך ניתן יהיה לנסות ולייצר אסטרטגיות **עמידות** למצבי הכישלון, כלומר כאלה המציעות מראש פתרון למצבים אלה; למשל: על ידי גידור הסיכון או על ידי התאמת מאפיינים מסתגלים לאסטרטגיה אם המשתנה האמור מגיע במהלך הדרך לרמות קריטיות. יתר על כן, ברגע שידועים אילו אסטרטגיות נכשלות במצבי עולם שונים, ניתן לדבר על שקלול התמורות (trade off) ביניהן. כך למשל אסטרטגיה אחת עשויה להיות בעייתית או מוצלחת במיוחד, כאשר קורה X, ואסטרטגיה אחרת עשויה להיות בעייתית או מוצלחת,

7 כדי לחשוף תרחישים, נוהגים מיישמי שיטת RDM להשתמש באלגוריתם PRIM – Patient Rule Induction שפיתחו פרידמן ופישר (Friedman & Fisher, 1999), ובאמצעותו ניתן לזהות בשיטתיות משתנים במודל המפיקים תוצאות חריגות. מספר מחקרים עסקו בשנים האחרונות בשיפור האלגוריתם ובהשוואתו לאלגוריתמים חלופיים (ראו למשל Lempert & Bryant, 2008; Bryant & Lempert, 2012).

כאשר קורה Y. אז יידרש קובע המדיניות לחדד את העדפות הסיכון שלו ואת מידת הסבירות שהוא מייחס לכל תרחיש, ובהתאם להן לבחור באסטרטגיה העמידה יותר בעיניו.

## דוגמאות לניתוח מדיניות המבוסס על תרחישים

בפרק זה אסקור שלוש דוגמאות לניתוח מדיניות המבוסס על תרחישים כמותניים שנערכו בשנים האחרונות, המבטאים את יסודות גישת RDM.

### משק האנרגיה הישראלי

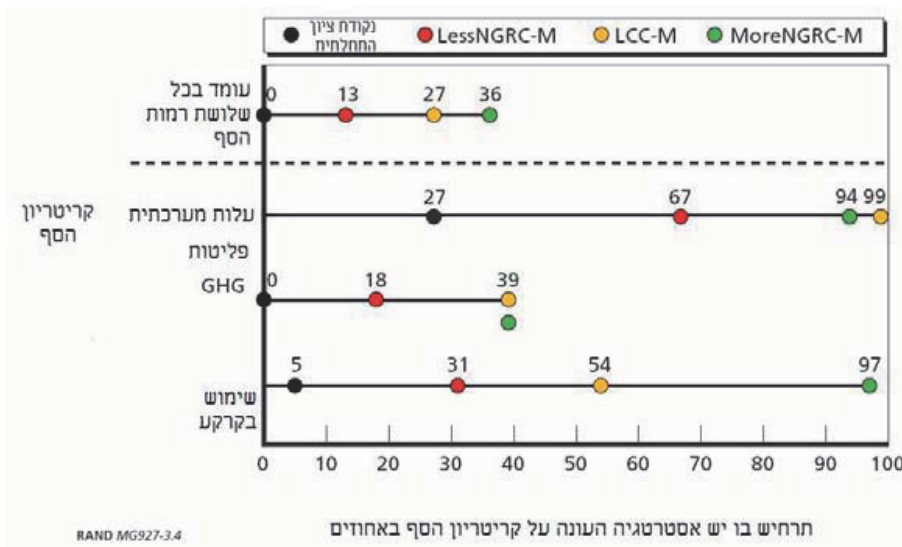
השימוש המרכזי הראשון בשיטת RDM לניתוח מדיניות בישראל נעשה במחקר של מכון ראנד על משק האנרגיה בישראל, שבמסגרתו ניתחו החוקרים אסטרטגיות מדיניות בנוגע למשק הגז הטבעי בישראל (Popper, Griffin, Berrebi, Light, & Min, 2009). החוקרים בחנו את ההחלטות האסטרטגיות שעמדו על הפרק בישראל בשנת 2009 בבקשם לענות על שאלה מרכזית אחת: מה צריך להיות תמהיל מקורות האנרגיה של ישראל בעתיד, ובפרט משקלו של הגז הטבעי בייצור אנרגיה?

ההחלטות התקבלו אז בתנאי אי-ודאות עמוקה שנבעה בין היתר ממחסור במידע על היקף המאגרים המקומיים, על מחירי הגז הטבעי, על הביקושים המקומיים ועל ההתפתחויות הטכנולוגיות הרלוונטיות להפקה ולשינוע של גז טבעי ועלותן. בעת כתיבת העבודה הנ"ל, בשנת 2009, טרם התגלה מאגר הגז הטבעי לווייתן שנמצא לחופי ישראל, ומדינת ישראל נדרשה לקבל וליישם החלטות אסטרטגיות מרחיקות לכת, הן בנוגע להעברת ייצור החשמל במשק לגז טבעי והן בנוגע לתמהיל השימוש בגז שמקורו בקידוחים במים עמוקים מקומיים ובגז טבעי נוזלי מיובא (LNG, להלן גז"ן).

בשלב הראשון של העבודה בנו החוקרים אלפי תרחישים על בסיס מודל של משק האנרגיה הישראלי. התרחישים נבנו על ידי צירופים של ערכים שונים שאינם בשליטת קובעי המדיניות (מחירי הגז והפחם, עלויות ייצור, ביקוש לחשמל, היצע האספקה מחו"ל ועוד) למשתנים שבבסיס המודל. דוגמאות לערכים שנכללו בתרחישים היו עלייה במחירי הגז הטבעי ממקורות שונים, עצירת אספקה הגז, ירידה או עלייה בביקושים לחשמל. החוקרים הצמידו לכל משתנה טווח של ערכים אפשריים, אך הניחו שההסתברות לכל ערך איננה ידועה, ולכן נתנו משקל זהה לכל תרחיש שנוצר. לעתידים האפשריים שנוצרו הוצמדו אסטרטגיות שונות שעסקו בהיקף האימוץ של גז טבעי, באנרגיות מתחדשות ובאמצעי היסכון אנרגטי. החוקרים בחנו כיצד האסטרטגיות האלה, בשילוב התרחישים שנבנו, עומדות ברמות סף נדרשות לאור שלושה מדדים: העלות המערכתית, היקף פליטות גזי החממה ומידת השימוש בקרקע. האסטרטגיה שעמדה בכל שלוש רמות הסף בתרחישים רבים יותר, ולכן

הייתה העמידה ביותר, הייתה זו ששילבה בין הגברת השימוש בגז טבעי לחתירה להגברת השימוש באנרגיות מתחדשות ולחיסכון אנרגטי (מסומנת בירוק בתרשים 1 להלן). החוקרים המליצו אפוא לבחור באסטרטגיה זו, שהמשמעות המרכזית שלה הייתה העברת היקפים נרחבים של ייצור האנרגיה במשק לגז טבעי, החלטה שיושמה בישראל. בה בעת לא חל גידול של ממש בשימוש באנרגיות מתחדשות ובאמצעים לחיסכון אנרגטי, כפי שהמליץ המחקר.

**תרשים 1: השוואת עלושי האסטרטגיות לשימוש בגז טבעי בישראל**

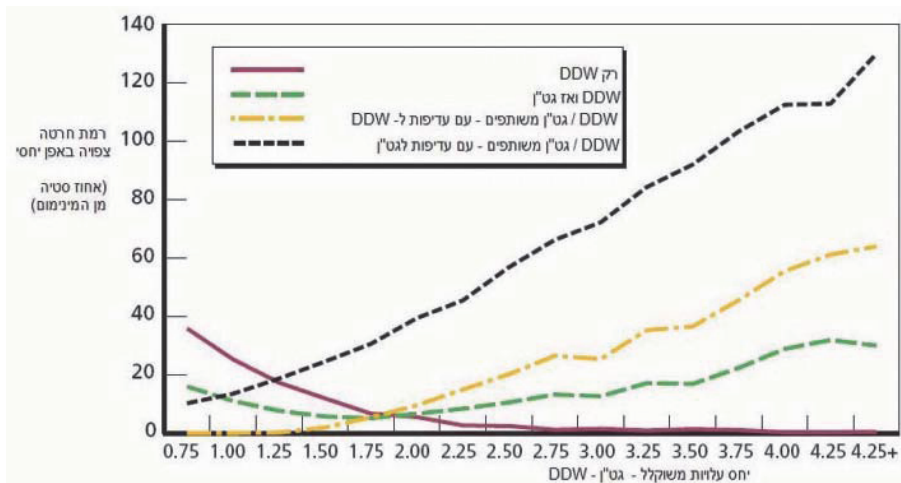


מקור: תרשים 4.1 המופיע בעמ' 53 בגרסה העברית של פופר ועמיתיו (Popper et al., 2009). תצלום התרשים באישור מכון ראנד.

לאחר מכן שאלו החוקרים כיצד לקבוע את תמהיל הייצור של הגז הטבעי, המורכב מגז טבעי נוזלי (גט"ן, LNG) ומגז שמקורו בקידוחי מים עמוקים. לשם כך הם בחנו את הביצועים של אסטרטגיות שונות של תמהיל הייצור לאור הסדרה הרחבה של התרחישים שנבנו. הניתוח הראה שאסטרטגיות הנערכות מראש לשימוש אפשרי בגט"ן עדיפות, מנקודת מבט של עמידות, על הסתמכות על מאגרי מים עמוקים בלבד. יחד עם זאת לא ניתן היה להכריע חד משמעית איך יש להיערך לשימוש בגט"ן – אם על ידי פיתוח יכולות קליטת גט"ן מראש או על ידי הותרת אפשרות לפיתוח שניתן יהיה לממשה בעת הצורך. בנייתו ראשוני נראה היה שאסטרטגיה שמייצרת מראש את היכולת לקלוט גט"ן עומדת ברמות סף נדרשות במספר רב יותר תרחישים, ולכן נראה שהיא עדיפה על פני יצירת אפשרות לפיתוח עתידי בלבד. יחד עם זאת היה צורך לחקור את מקור הכישלון של האסטרטגיות השונות ואת המקרים שבהם אחת עדיפה על פני האחרת, כדי לקבל תמונה מושכלת יותר.

בהיעזרם בתוכנות מחשב לכריית מידע, פנו החוקרים להבין מהו המשתנה המרכזי הקובע את מקור ה"כישלון" של אסטרטגיות לניהול תמהיל הגז הטבעי, המשלבות בין שתי החלופות לשימוש בגט"ן לבין קידוחים במים עמוקים. תוצאות הניתוח הראו שרמת החרטה (regret) תלויה במידה רבה ביחס בין עלות יבוא הגט"ן לבין עלות השימוש בקידוחי מים עמוקים – משתנה המאופיין באי-ודאות עמוקה. מטבע הדברים, ככל שהעלות היחסית של גט"ן גבוהה יותר, כך החרטה על ההחלטה על שימוש בו גבוהה יותר. אולם הניתוח בתרשים 2 מראה גם שרמות החרטה היחסיות, באסטרטגיה הדוחה את תחילת השימוש בגט"ן (מסומן בקו ירוק מקווקו) ושומרת אותו כאפשרות להמשך, נמוכות יחסית בהשוואה לחלופות, גם אם אין אפשרות זו מיטבית בכל תרחיש שהוא. תרשים 2 אף מאפשר למקבלי ההחלטות להבין טוב יותר את השלכות הנחותיהם על יחס המחירים בין גט"ן לקידוחי מים עמוקים, על החרטה הצפויה עקב ההחלטה האסטרטגית שלהם.

**תרשים 2: רמת החרטה היחסית בשל העלות הצפויה הכוללת של אספקת גז טבעי בהשוואה לאספקת גט"ן לאור השימוש בארבע אסטרטגיות האספקה**



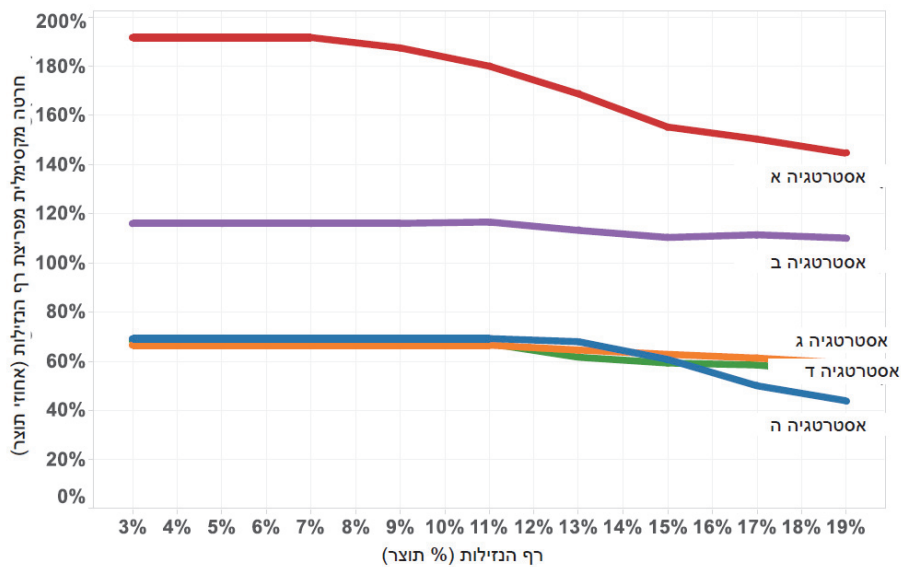
מקור: תרשים 4.2 המופיע בעמ' 55 בגרסה העברית של פופר ועמיתים (Popper et al., 2009). תצלום התרשים באישור מכון ראנד.

המחקר לעיל הוא דוגמה מובהקת לשימוש בגישת RDM, המייצרת אלפי תרחישים כמותניים והמנצלת יכולות מחשוב מתקדמות כדי לזהות אסטרטגיות עמידות, לחשוף את הגורמים לכישלונות ולהבין טוב יותר את היתרונות והחסרונות של כל אסטרטגיה ואת רגישותה להנחות על העתיד. בסופו של יום אין היא מציעה למקבל ההחלטות תשובה מיטבית אחת, אבל היא מאפשרת לחשוף לפניו את השאלות שעליו לבחון בעת בחירת אסטרטגיה כלשהי.

### ניהול חוב ממשלתי בישראל

דוגמה מובהקת לשימוש בשיטת RDM לקבלת החלטות כלכליות ופיננסיות היא העבודה שעסקה בניתוח אסטרטגיות ניהול החוב הממשלתי בישראל (Abramzon, 2014). בעבודה זו בחנתי את ההשלכות על תיק החוב הממשלתי של אלפי תרחישים המתארים עתידים מקרו-כלכליים ופיננסיים שונים. בתרחישים אלה נבחנו רמות שונות של צמיחה כלכלית, גירעון ממשלתי, אינפלציה, שער החליפין וכדומה, משתנים הנתונים כולם באי-ודאות עמוקה. מול אותם תרחישים נבחנו כ-20 אסטרטגיות שונות של תמהיל הנפקות החוב של ממשלת ישראל. אסטרטגיות אלה מאופיינות בהרכבים שונים של כלים פיננסיים למימון החוב מבחינת טווח הפדיון ומבחינת מאפייני ההצמדה למטבע חוץ, למדד המחירים לצרכן ולריבית הבנק המרכזי.

#### תרשים 3: רמת חרטה מרבית בנוגע להמש אסטרטגיות לניהול חוב כפונקציה של רף הנזילות של המדינה



מקור: תרשים 4.4, p. 31, Abramzon, 2014.

דוגמאות לחלק מתוצאות הניתוח מופיעות בתרשים 3 לעיל. כאן מתוארת רמת החרטה (regret) המרבית, במונחי תוצר, של המש אסטרטגיות ניהול חוב כפונקציה של משתנה המכונה "רף הנזילות" (liquidity buffer). משתנה זה מציין רף שכאשר תשלומי החוב השנתיים עוברים אותו, המדינה צפויה לחוות משבר כלכלי כבד משקל. ערכו האמיתי של רף הנזילות אינו ידוע; כלומר: הוא מאופיין באי-ודאות עמוקה. ניתוח RDM מחשב את ביצועי האסטרטגיות השונות ברמות אפשריות שונות שלו.

התרשים מראה שבמונחי חרטה מרבית אסטרטגיות א ו-ב נחותות בהשוואה לאחרות. שאר האסטרטגיות (ג, ד ו-ה) מפיקות תוצאות דומות במונחי חרטה מרבית, כל עוד ערך רף הנזילות של המדינה נמוך מ-13% תוצר. אם רף הנזילות של המדינה גבוה מ-13%, כלומר היא יכולה לספוג תשלומי חוב שנתיים גבוהים יותר, אסטרטגיה ה מציגה תוצאות טובות יותר ולכן עמידה יותר. זוהי אסטרטגיה הנותנת משקל יתר לאיגרות חוב צמודות מדד.

עבודה זו (Abramzon, 2014) הראתה שמידת עמידותה של אסטרטגיית הנפקת חוב ממשלתי תלויה מאוד בהנחות של מקבל ההחלטות בדבר מרחב התמרון שיש לו מבחינת נזילות בעת משבר, נתון המתאפיין מטבעו באי-ודאות עמוקה. בהמשך העבודה הוספתי לאסטרטגיות ניהול החוב אלמנטים גידוריים וניתחתי אותם. בכלל זה הצגתי ניתוח המראה שלישראל כדאי לשקול בחיוב את הגדלת היקף ההנפקות בריבית משתנה, שכן הסיכון בהן לאור הנחות סבירות אינו גבוה. עוד הראה הניתוח ששימוש בכלי חוב המתואמים עם התמ"ג ומדיניות הארכת הטווח לפדיון בעת משבר פיסקלי מחזקים במצבי קיצון את עמידות החוב הממשלתי.

עבודה זו העמידה חלופה לגישות המקובלות בעולם לניהול החוב הממשלתי. הגישה המרכזית שרווחה במיוחד עד למשבר הפיננסי של שנת 2008 ערכה ניתוחי סיכונים לתיק חוב נתון על בסיס מודלים סטוכסטיים, שהניחו הנחות חדות בדבר ההתפלגות והערכים של משתנים פיננסיים וכלכליים. בדיעבד הוכח שרבות מהנחות אלה אינן סבירות. לצד הגישה הסטוכסטית רווח גם שימוש בגישה הדטרמיניסטית. חסרונה היה מספר התרחישים המצומצם שנבחנו ואופן בחירתם השרירותי. גישת ה-RDM משלבת רעיונית בין שתי הגישות האלה. אמנם היא דטרמיניסטית במהותה, אבל השימוש באלפי תרחישים לצורך הניתוח מייצר רצף תרחישים הדומה בסגנונו לניתוח הסטוכסטי, גם אם אינו מניח הסתברויות.

## נמל לוס אנג'לס

הנהלת נמל לוס אנג'לס ביקשה ממספר חוקרים לסייע לה להחליט אם לבצע עיבוי יקר של הנמל במועד השדרוגים הקרוב שתוכנן (Striver, Lempert, Wikman-Svahn, & Keller, 2018). עיבוי הנמל נועד לסייע בהתמודדות עם סיכוני סופות, הצפות ועליית מפלס הים, מצבי עולם שאין הסתברותם ידועה. בתנאי אי-ודאות רגילה, כשההסתברויות להתממשות הסיכונים ידועות, היו החוקרים יכולים לערוך תחשיב עלות-תועלת, הלוקח בחשבון את תוחלת העתיד הצפוי בהשוואה לתוחלת עלותו. אולם במצב הנתון של אי-ודאות עמוקה פנו החוקרים לתכנון המבוסס על תרחישים.

הם בנו מאות עתידיים אפשריים המבוססים על צירופים של ערכי משתנים לא ודאיים, ובהם מפלס המים העתידי, האפשרות של עלייה מפתיעה במפלס המים ועיתויה, תוחלת החיים של

הנמל הנוכחי ועלויות העיבוי בעתיד. תרחישים אלה נבחנו לאור שתי אפשרויות המדיניות שעל הפרק – לבצע לאלתר את עיבוי הנמל או לשמור את האפשרות להמשך. אלגוריתם של גילוי תרחישים (scenario discovery) חשף שלושה מצבי עולם קיצוניים יעוררו חרטה על אי ביצוע העיבוי בשדרוג הקרוב: עלייה של מפלס הים ב-14 מ"מ בשנה; התארכות תוחלת החיים של הטרימינל ל-50 שנה ויותר; עלייה חדה בתדירות הסופות הימיות. חישוב פשוט הראה שנכון יהיה לבצע את העיבוי לאלתר, רק אם מקבלי ההחלטות יאמינו שהסתברות להתממשות תרחישים העונים לשלושה קריטריונים אלה גבוהה מ-7%. פנייה לספרות המחקרית הראתה שאף שאין יודעים את מידת ההסתברות המדויקת, אין הסתברות זו סבירה בעליל, ולכן המליצו לקובעי המדיניות שלא לעבות את הנמל בשלב זה.

## סיכום

במאמר זה נסקרה גישה מרכזית, **קבלת החלטות עמידות (RDM)**, שפותחה בשנים האחרונות לצורך קבלת החלטות במצבי אי-ודאות עמוקה, על סמך שימוש בתרחישים כמותניים. בגישה זו משתמשים בכוח מחשובי מתקדם של מידול וכריית מידע והחלתם על סדרה רחבה של תרחישים. זהו כלי חדשני ותרומי המאפשר לקובעי המדיניות לקבל החלטות מושכלות יותר גם במצבים שבהם לא ניתן לחזות את העתיד הצפוי או להניח הסתברויות להתרחשותו.

יחד עם זאת, יש לעמוד על המגבלות ועל האתגרים הכרוכים בשימוש בכלי מסוג זה. ראשית, ניתוח מסוג זה מחייב מודל המאפשר לייצר את התרחישים לניתוח, ונדרשים לכך משאבים וזמן בלתי מבוטלים. במקרים רבים, שבהם בעיית המדיניות פשוטה יחסית והאסטרטגיות האפשריות ברורות ומעטות, קשה להצדיק את המאמץ הרב הנדרש לניתוח RDM. יש גם תחומים (תחומי חברה ורווחה למשל) שמידולם קשה עד בלתי אפשרי או לחילופין קשה מאוד להצמיד ערכים כמותניים למצבי העולם הרלוונטיים להם.

קושי בולט אחר הוא דרישת הנתונים של המודל, ובפרט אימוץ הנחות בנוגע לטווח האפשרי (Min/Max) של כל המשתנים המאופיינים באי-ודאות עמוקה. החלטות בדבר הגבולות של כל משתנה יכולות לקבוע את תוצאות הניתוח לכאן ולכאן. על מנתח מדיניות לוודא אפוא שהוא מסוגל לעמוד מאחורי הערכים שהוא קבע למרחב האפשרויות של המשתנים במודל ושל התרחישים שנוצרו מהם.

במקרים שבהם לא ניתן לקבוע את מקרי הקיצון של התרחישים, ניתן לשקול שיטות ניתוח חלופיות. שיטת Info-Gap היא דוגמה מובהקת לשיטה הפותרת במידה רבה את האתגר הנ"ל. השיטה דורשת ממנתח המדיניות להגדיר את התוצאות הקריטיות (לרעה או לטובה) מבחינתו, ולאחר מכן להתמקד בתרחישים המייצגים תוצאות אלה. כך נחסך הצורך לייצר סדרה מלאה של התרחישים האפשריים. השיטה מתמקדת באפיון המרחק שמייצרת

אסטרטגיה כלשהי בין נקודת המוצא לבין הגבולות שמקבל ההחלטות יכול להסכין להם. המרחק לנקודת הקצה השלילית מוגדר "עמידות" (robustness), ואילו המרחק לנקודת הקצה החיובית מוגדר "הזדמנותיות" (opportuneness), והוא תלוי כאמור במקבל ההחלטות.<sup>8</sup>

בסופו של יום, אחד האתגרים הנכבדים של כלל השיטות לניתוח כמותני של תרחישים הוא מידת יכולתו ורצונו של מקבל ההחלטות להבין את הניתוח ולזהותו ככלי שימושי. צפוי אפוא שמקבל ההחלטות ייטה לדלג על שיטות מורכבות ומסובכות שהוא מתקשה להבין את ניתוחן ואת תועלתן.

יחד עם זאת, השימוש הגובר בשיטות ניתוח התרחישים בעולם המדיניות מעיד ככל הנראה על הערך הגדול שהן עשויות להפיק ועל העדר חלופות ראויות להתמודדות עם אי-ודאות עמוקה. השימוש בכלים כמו RDM בתחומי המדיניות החברתית והכלכלית רלוונטי היום יותר מתמיד, כשברור שהנחות מקובלות רבות לתכנון כלכלי המבוסס על הסתברות אינן תקפות. היתרונות של גישת RDM טמונים, לא ביכולתה לחשוף לפני קובעי המדיניות את ההחלטה המיטבית (אין לה יכולת כזאת), אלא ביכולתה להוביל להבנה עמוקה יותר של שקלול התמורות של האסטרטגיות השונות ושל המידה שבה ההצלחה רגישה להנחות באשר לעתיד לבוא. ידע זה עשוי לאפשר למנתחי המדיניות לזהות ולעצב פעולות מדיניות עמידות יותר לנוכח הסיכונים האפשריים.

## מקורות

חסון, ש' (עורך) (2002). **יחסי דת חברה ומדינה: תסריטים לישראל**. ירושלים: מחקרי פלורסהיימר.

חסון, ש', בן בסט, א', הלוי, א', נאמן, א', ניומן, ד', סיבל, ר', סלע, א' ופייטלסון, ע' (עורכים) (2011). **הגבולות העתידיים בין ישראל לרשות הפלסטינית – עקרונות, תסריטים והמלצות**. ירושלים: מרכז שאשא למחקרים אסטרטגיים.

Abramzon, S. (2014). *Strategies for managing sovereign debt – A robust decision making approach*. Santa Monica, Ca: The Pardee RAND Graduate School.

Bankes, S. (1993). Exploratory modeling for policy analysis. *Operations Research*, 41(3), 435-449.

8 מספר מחקרים השוו בין Info-Gap לבין RDM (ראו למשל Hall et al., 2012).



- Ben-Haim, Y. (2006). *Info-gap decision theory: Decisions under severe uncertainty*. Cambridge, Ma: Academic Press.
- Bradley, S. (2014). Imprecise probabilities. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2014 ed.)*. Stanford, CA: Stanford University.
- Bryant, B. P. & Lempert, R. J. (2010). Thinking inside the box: A participatory, computer-assisted approach to scenario discovery. *Technological Forecasting and Social Change*, 77(1), 34-49.
- Ferson, S. (2002). *RAMAS Risk Calc 4.0 software: Risk assessment with uncertain numbers*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Friedman, J. H. & Fisher, N. I. (1999). Bump hunting in high-dimensional data. *Statistics and Computing*, 9(2), 123-143.
- Hadka, D., Herman, J., Reed, P., & Keller, K. (2015). An open source framework for many-objective robust decision making. *Environmental Modelling & Software*, 74, 114-129.
- Hall, J. W., Lempert, R. J., Keller, K., Hackbarth, A., Mijere, C., & McInerney, D. J. (2012). Robust climate policies under uncertainty: A comparison of robust decision making and info-gap methods. *Risk Analysis*, 32(10), 1657-1672.
- Hasson, S. & Abu-Asbah, K. (2004). *Jews and Arabs in Israel facing a changing reality: Dilemmas, trends, scenarios and recommendations* (Paper 3, 32). Jerusalem: The Floersheimer Institute for Policy Studies.
- Head, B. W. & Alford, J. (2015). Wicked problems: Implications for public policy and management. *Administration & Society*, 47(6), 711-739.
- Kurtz, C. F. & Snowden, D. J. (2003). The new dynamics of strategy: Sense-making in a complex and complicated world. *IBM Systems Journal*, 42(3), 462-483.
- Knight, F. H. (1921). *Risk, uncertainty and profit*. New York: Hart, Schaffner and Marx.
- Kwakkel, J. H. & Pruyt, E. (2013). Exploratory modeling and analysis: An approach for model-based foresight under deep uncertainty. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(3), 419-431.

- Leggett, J., Pepper, W. J., Swart, R. J., Edmonds, J., Meira Filho, L. G., Mintzer, I., & Wang, M. X. (1992). Emissions scenarios for the IPCC: An update. In J. T. Houghton, B. A. Callander, & S. K. Varney (Eds.), *Climate change 1992: The Supplementary report to the IPCC scientific assessment* (pp. 69-95). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lempert, R. J., Bryant, B. P., & Bankes, S. C. (2008). *Comparing algorithms for scenario discovery*. Santa Monica, CA: RAND.
- Lempert, R. J., Popper, S. W., & Bankes, S. C. (2003). *Shaping the next one hundred years: New methods for quantitative, long-term policy analysis*. Santa Monica, CA: RAND.
- Manski, C. F. (2013). *Public policy in an uncertain world: Analysis and decisions*. Cambridge, Ma: Harvard University Press.
- Makridakis, S. & Taleb, N. (2009). Decision making and planning under low levels of predictability. *International Journal of Forecasting*, 25(4), 716-733.
- Popper, S., Griffin, J., Berrebi, C., Light, T., & Min, E. Y. (2009). *Natural gas and Israel's energy future: A strategic analysis under conditions of deep uncertainty*. Santa Monica, CA: RAND.
- Shiftan, Y., Kaplan, S., & Hakkert, S. (2003). Scenario building as a tool for planning a sustainable transportation system: Transportation research (part D). *Transport and Environment*, 8(5), 323-342.
- Sriver, R. L., Lempert, R. J., Wikman-Svahn, P., & Keller, K. (2018). Characterizing uncertain sea-level rise projections to support investment decisions. *PloS one*, 13(2), e0190641.
- Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy logic. *Computer*, 21(4), 83-93.