



עלטה: ניתוח השלכות וסיכונים מערכתיים של תרחישי עלטה בישראל

ד"ר אסף צחור, אברי שכטר, הילה גוטפלד, ד"ר מירי מזרחי ראובני, ד"ר ניר שרב, ד"ר יונתן אוסטרומצקי

מכון ינאי לביטחון אנרגטי

מכון ינאי תומך בביטחון וחוסן אנרגטי, בישראל ובעולם. המכון יוזם ומוביל מחקרים בסוגיות המפתח של משקי אנרגיה וביטחון אנרגטי. עבודת המכון משלבת כלכלה יישומית, ניתוח רגולטורי ומוסדי, הערכות סיכונים ותרחישים, ונשענת על נתונים וכלים אנליטיים. המכון מתרגם ממצאים להמלצות ישימות לעיצוב מדיניות ארוכת טווח לקידום משק אנרגיה יעיל ובר קיימא.

העמדות המובאות בעבודה זו הינן באחריות הכותבים בלבד, ואינן משקפות בהכרח את עמדות אוניברסיטת רייכמן. עבודה זו נועדה לתרום ולקדם דיון ציבורי ומקצועי. אין לראות בה מסמך אופרטיבי או הערכה ממצה של כלל תרחישי הייחוס האפשריים. חלונות הזמן המוצגים כאן משמשים לבחינת השפעות אפשריות של עלטה, ואינם מהווים קביעה חד-משמעית של ספי כשל או לוחות זמנים בפועל, אשר תלויים בנסיבות האירוע, מאפייניו והתגובה המערכתית בזמן אמת.

פרטי התקשורת:

מכון ינאי לביטחון אנרגטי

ביה"ס לקיימות, אוניברסיטת רייכמן

רחוב האוניברסיטה 8, הרצליה

דוא"ל: yannay.institute@rni.ac.il

אתר: <https://www.rni.ac.il/research-institutes/sustainability> /מכון-ינאי-לביטחון-אנרגטי

צוות החוקרים:

ד"ר אסף צחור, אברי שכטר, הילה גוטפלד, ד"ר מירי מזרחי ראובני, ד"ר ניר שרב, ד"ר יונתן אוסטרומצקי

עלטה

ניתוח השלכות וסיכונים מערכתיים של תרחישי עלטה בישראל

מחברים:

ד"ר אסף צחור¹, אברי שבטר², הילה גוטפלד³, ד"ר מירי מזרחי ראובני⁴, ד"ר ניר שרב⁵, ד"ר יונתן אוסטרומצקי⁶

תודות מיוחדות:

תא"ל (במיל") זאב צוק רם, מנהל אגף חירום, חברת נגה לניהול המערכת, וראש הרשות הלאומית לחירום (בדימוס)

דני לקר, מנהל אגף בכיר חירום, ביטחון מים וסייבר, רשות המים

מר דני גרינוולד, סמנכ"ל אסדרה ברשות המים (בדימוס)

נציגי משרד התקשורת;

ה"ח בארי כספי, ראש תחום רגולציה פיננסית במכון הפניקס לחקר שוק ההון, אוניברסיטת רייכמן וסמנכ"ל כספים

בהכשרה חברה לביטוח

¹ מייסד ומנהל אקדמי של מכון ינאי לביטחון אנרגטי, בית הספר לקיימות, אוניברסיטת רייכמן

² מנהל מכון ינאי לביטחון אנרגטי, בית הספר לקיימות, אוניברסיטת רייכמן

³ מנהלת פרויקטים, מכון ינאי לביטחון אנרגטי, בית הספר לקיימות, אוניברסיטת רייכמן

⁴ סגן דיקן ומנהלת בית ספר דינה רקנאטי לרפואה, אוניברסיטת רייכמן

⁵ מומחה וחוקר תחבורה, יועץ בכיר למשרד התחבורה והבטיחות בדרכים

⁶ הפקולטה להנדסה, אוניברסיטת תל אביב

תוכן עניינים

| | |
|----|--|
| 4 | מבוא: כשהאורות כבים |
| 7 | תקציר מנהלים..... |
| 13 | חלק ראשון: יסודות, הקשר, מתודולוגיה |
| 13 | פרק 1: מהי עלטה, ניסיון במקרי עלטה בעולם..... |
| 14 | פרק 2: היעדר התייחסות שיטתית להשלכות עלטה בישראל |
| 16 | פרק 3: מתודולוגיה – אופרציונליזציה של מודל עניבת הפרפר (BOWTIE) |
| 19 | פרק 4: סיכונים, סבירות, ונזק של אירועי עלטה מלאים וחלקיים בישראל |
| 23 | חלק שני: השלכות עלטה על תשתיות ומערכות חיוניות לאורך זמן..... |
| 23 | פרק 5: עלטה בתשתיות ומערכות תקשורת..... |
| 28 | פרק 6: עלטה בתשתיות ומערכות מים..... |
| 33 | פרק 7: עלטה במערכות חקלאות-מזון..... |
| 36 | פרק 8: עלטה בתשתיות ומערכות תחבורה..... |
| 41 | פרק 9: עלטה בתשתיות ומערכות בריאות |
| 45 | פרק 10: עלטה בתשתיות ומערכות בנקאות ופיננסיים |
| 49 | חלק שלישי: השפעות בין-מגזריות |
| 49 | פרק 11: ממשקים בין מערכות ותשתיות חיוניות |
| 52 | פרק 12: טופולוגיה של קשרי גומלין ותלות..... |
| 53 | חלק רביעי: מניעה, חוסן, וניהול אירועי עלטה |
| 53 | פרק 13: מבאן והלאה..... |

מבוא: כשהאורות כבים

במונחים של ניהול סיכונים, עלטה (Blackout) היא מצב בו רשת החשמל, בשל כשל באחד או יותר ממקטעיה (ייצור, הולכה, חלוקה, מערכות בקרה), מאבדת מיכולתה לספק חשמל באופן רציף ויציב, בהיקף משמעותי.

תוך זמן קצר, דקות בודדות עד שעות ספורות, מתחיל תהליך "החשכה" של מערכות ותשתיות חיוניות במשק, ברמות חומרה משתנות: תקשורת (אינטרנט ביתי קורס בשל ניתוק נתבים), תחבורה (תחנות תדלוק נסגרות, להוציא "תחנות צי ברזל", רמזורים כבים, רכבים חשמליים, אוטובוסים חשמליים, ומערכות מסילתיות מושבתות), מים וטיפול בשפכים (משאבות מים ברבי קומות חדלות לעבוד), חקלאות ומזון (מקררים ומקפיאים שובקים חיים), בריאות (צמצום שירותי בריאות מרחוק ובחלק מהמרפאות הקהילתיות), בנקאות ופיננסיים (כספומטים מפסיקים לתפקד). משאבים נעשים מוגבלים והתחרות עליהם מתעצמת. בד בבד, מתחוללת זליגת סיכונים והפרעות (disruptions) ממערכת אחת (למשל, תקשורת) לשנייה (למשל, תחבורה), ואז למערכת נוספת (למשל, בריאות). הסדר הציבורי מתערער. פאניקה פושה.

לשון אחר, אחד ממאפייני היסוד של אירועי עלטה הוא זליגת סיכונים בין-מגדרית, המכונה גם "מפל סיכונים" או שרשרת כשל מתגלגלת.

מבנה המשק המודרני הוא כזה של מערכות ותשתיות חיוניות התלויות זו בזו (tight-coupling), מבנה אשר מכונה לא אחת "מערכת של מערכות" (a system of systems). חשמל מפרנס את מערכות התקשורת, המים והמזון, התחבורה והבריאות, החינוך, הבנקאות והפיננסיים. המערכות הללו בתורן תלויות, או למצער משפיעות, זו על זו. מים על בריאות; תקשורת על פיננסיים ובנקאות; מים על מזון. התלות הזו – והשפעות הגומלין – מנוהלות, לעיתים, באמצעות מערכות שליטה ובקרה ומערכות ניהול רשת (ICS/SCADA/EMS), המאפשרות קבלת החלטות תפעוליות.

באירועי עלטה כשל במערכת אחת (אנרגיה-חשמל) לעולם לא נותר "כשל מקומי". הוא זולג במהירות למערכות נוספות, מכפיל ומחמיר סיכונים, מרע את הזנק, והופך תוך זמן קצר לשרשרת כשל מתגלגלת שבה רכיב אחרי רכיב חדל לתפקד. מכאן החשיבות של ניהול תלות בין תשתיות חיוניות אשר עשוי, במיטבו, לקבוע האם הכשלים נבלמים או שמא מתפשטים והולכים, ומשתקים חלקים שלמים בכלכלה ובחברה.

מטרת עבודה זו להציע אנליזה מערכתית ראשונית שתמיר את השיח הכללי, התקשורתי ולעיתים הפשטני והפופוליסטי על "תרחישי עלטה" בישראל – במסגרת שיטתית, עקבית ואחידה לניהול סיכונים. העיקרון המארגן של העבודה פשוט: גם כאשר תרחיש מסוים מוגדר כבעל הסתברות נמוכה, עצם פוטנציאל הנזק הרחב – ובכלל זה העובדה שהמשק מקיים תלות הדדית והדוקה בין מגזרים (מים, מזון, מסחר, תחבורה, תקשורת, בריאות, בנקאות) – מחייבים תכנון לחוסן, רציפות תפקודית, ותהליכי התאוששות מבוססי ניהול סיכונים.

בהקשר הישראלי יש כמה מאפיינים שמחריפים את השלכות תרחישי העלטה. ישראל מתוארת לא אחת כ"אי אנרגטי" בשני מובנים תשתיתיים. במובן אחד, מערכת חשמל הנשענת במידה רבה על גז טבעי ממספר מצומצם של מאגרים. במובן שני, מערכת חשמל שאינה נשענת על חיבורי גיבוי משמעותיים לרשתות שכנות, ולכן יכולת הייצוב והעקיפה שלה בשעת משבר מוגבלת יחסית למדינות המחוברות לשכנותיהן, כמו למשל ביבשת אירופה.

במקביל, המשק תלוי בשרשראות אספקה של דלקים וחומרי גלם אנרגטיים (למשל פחם), והעובדה שתשתיות הולכה וייצור מרוכזות גיאוגרפית ותפעולית – לצד צפיפות אוכלוסין ותלות גבוהה של שירותים אזרחיים ותשתיות חיוניות באספקת חשמל רציפה – יוצרת תנאים שבהם גם שיבוש חלקי עלול להתפתח במהירות לאירוע בעל השלכות רחביות על תפקוד המשק.

הדיון הציבורי סביב תרחישי עלטה התחדד על רקע המלחמה הרב-זירתית שפרצה ב-2023 ולאור תרחיש הייחוס הלאומי לעלטה, המיוחס לרשות החירום הלאומית (רח"ל), לפיו חלק ניכר מהמשק (כ-60%), ובפרט משקי בית, עלולים להיוותר ללא אספקת חשמל לפרק זמן של 72 שעות. לדיון הציבורי יש גם ממד תפיסתי-חברתי מדיד: מחקר מאוניברסיטת חיפה מצא שרוב הציבור (80%) מודע לאיום הפסקות חשמל בזמן עימות ותופס אותו כחמור ביחס לאירועי חירום אחרים; במקביל, שיעור ניכר מן המשיבים (64%) הביע דאגה מפני עלטה ממושכת ותחושת מסוגלות נמוכה להתמודד איתה. הדאגות המובילות של הציבור מתמקדות בפגיעה אפשרית באספקת מים, מזון ושירותי בריאות – שלוש תשתיות שמופיעות גם בניתוח זה כמכפילי סיכון מערכתיים בתרחישי עלטה מתמשכים.¹ עם פרסום תרחיש הייחוס בתקשורת משרד האנרגיה והתשתיות מיהר להסתייג ולהגדיר את התרחיש "תרחיש קיצון בעל סבירות נמוכה". יחד עם זאת, יש להניח כי משרדי הממשלה פועלים להיערכות לצמצום ההסתברות, ניהול משבר אפשרי, ותכנון להאצת חזרה לשגרה.

על רקע זה, השורה התחתונה של עבודה זו היא כפולה. ראשית, עלטה היא "אירוע-על" חוצה מגזרים ולכן לא נכון לנהל אותה – ולא ניתן לנהל אותה היטב – באמצעות ניתוח מגזרי מבודד, ללא שיתוף מומחים ונציגי ציבור, שמסתכם לפי ההגדרה "ב-72 שעות" (שלוש יממות; פרק זמן קצר ועל כן אופטימי). כאשר כל סקטור מתכנן היערכות "לעצמו", מתקבלת תמונת מצב חלקית ונוצרים פערים דווקא בנקודות הממשק הקריטיות בהן התלות ההדדית גבוהה – למשל בציר חשמל-תקשורת-פיננסים (קריסת תשלומים, העברת מידע), או בציר חשמל-מים-בריאות (קריסת פעילויות אספקה, טיפול וטיהור; תפקוד בתי חולים; פגיעה בבריאות הציבור; תחלואה ותמותה עודפת).

שנית, קיימות נקודות תורפה הנדסיות-מערכתיות שמבליחות בכל תרחיש: צמתי הולכה מרכזיים, תחנות מיתוג, תחנות שנאים אזוריות ומקטעים ברשת שמתפקדים כ"צווארי בקבוק" או נקודות מחנק (chokepoints) עם חלופות מוגבלות. לפי עבודות קודמות, פגיעה בצמתים אלה שונה מפגיעה בנקודות אחרות במערכת שכן לעיתים אין חלופה תפעולית זמינה, ושיקום צוואר הבקבוק עלול להימשך ימים ואף שבוע (168 שעות).

על רקע זה, ומטעמים נוספים שיתחוו בהמשך, אנו מציעים את העבודה הזו. תחילה, אנו מגדירים מהי "עלטה" ואילו צורות היא לובשת, על סמך ניסיון בעולם בעשור האחרון. לאחר מכן, אנו מציעים על הפער המתודי בניהול סיכונים לעלטה בישראל, ומסבירים מדוע הדיון הציבורי והמוסדי נוטה לעיתים להיתקע בשאלת "האיומים" ו-"הסבירות" עוד לפני שמגיעים לשאלות של תפקוד, רציפות והתאוששות במהלך ולאחר האירוע.

בהמשך, אנו מציעים מודל ניהול סיכונים תיאורי (descriptive) אופרטיבי המבוסס על מודל עניבת הפרפר (Bowtie), אך עם היפוך מרכז הכובד: במקום להרחיב שוב ברשימת האיומים והטריגרים – שזכתה לדיון נרחב במקורות אחרים (למשל, INSS ורח"ל) – העבודה הנוכחית ממקדת את הניתוח באירוע העלטה עצמו ובדינמיקה שאחרי, לאורך ציר זמן מובנה של 24 עד 168 שעות (יממה עד שבוע), תוך בחינה סקטוריאלית ותשומת לב לזליגת סיכונים בין מערכות ותשתיות. הדיונים במערכות השונות כולל גם מגמות עומק שיעצבו את המשק בשנים הקרובות; ביזור הייצור, פריסת תשתיות אגירה, גידול בחוות שרתים, והתרחבות התחבורה החשמלית (חישמול צי הרכב) – ועוסק בקצרה באופן בו מגמות אלה משנות את פרופיל הסיכון ואת אסטרטגיות החוסן הנדרשות. אנו עוסקים בממשקים בין מערכות, ומסיימים עם כמה המלצות כלליות לשיפור המוכנות וההיערכות לאירועי עלטה.

העבודה מהווה אפוא צעד ראשון בכיוון. זהו ניסיון להניח תשתית מושגית ומתודית אחידה לדיון ב"עלטה" כבעיה מערכתית, ולא כאוסף של תקלות נקודתיות או "תרחיש קיצון בעל סבירות נמוכה". השאיפה היא שהמסגרת המוצעת כאן תשמש בסיס להמשך עבודה משותפת עם שותפים בישראל ובעולם – רגולטורים, מפעילי מערכות

חשמל, גופי חירום, תשתיות תקשורת ומים, מוסדות בריאות ומוסדות פיננסיים – במטרה לשפר את איכות התרחישים, את מדדי החוסן, ואת שיטות ניהול הסיכונים.

הסיבה לכך עמוקה, ומעשית: תופעת העלטה היא אוניברסלית (ראו אירועי עלטה בספרד, פורטוגל, אוקראינה וארה"ב). מערכות חשמל ותשתיות קריטיות ברחבי העולם מתמודדות עם אותה משפחת אתגרים – תלות הדדית בין סקטורים, דיגיטציה של מערכות בקרה, חשיפה גוברת למתקפות סייבר, אירועי קיצון אקלימיים וגיאופיזיים, והתרחבות צרכני-על דוגמת חוות שרתים וטעינת רכבים חשמליים. לכן הידע הרלוונטי מצטבר גלובלית, לא רק מקומית. יתירה מזו, גם אם אירוע עלטה מתרחש בתוך גבולות המדינה, השפעותיו אינן בהכרח "כלואות" באותה טריטוריה: שרשראות אספקה, תלות בשירותי ענן וקישוריות בינלאומית, שווקים פיננסיים, תנועת סחורות וזרימת מידע, כולם פועלים במרחב משולב.

מכאן נובעת חשיבותה של עבודה משווה ולמידה הדדית: לבחון מקרי מבחן, לייצר שפה מקצועית משותפת, לאמץ סטנדרטים וכלים מתקדמים, ולפתח שיתופי פעולה מחקריים ותפעוליים שיאפשרו לא רק להפחית הסתברות לאירוע, אלא גם לצמצם את נזקיו, לבלום זליגות סיכון, ולהאיץ התאוששות בזמן אמת.

חשוב להדגיש פעם נוספת: מסמך זה הוא מהלך פתיחה ולא "מילה אחרונה". הוא מציע מסגרת עבודה ראשונית, שמטרתה להניע תהליך, לא לקבע אמת סופית. מטבע הדברים, תרחישים, קבועי זמן, ספי קריסה, השלכות והשלכות-המשנה המוצגות כאן עשויות להתברר כחלקיות, שמרניות מדי או מחמירות מדי – בפרט משום שמדובר במערכת מורכבת שבה התנהגות מושפעת מהקשר, מעיתוי, ומרמת מוכנות משתנה של מוסדות רבים.

דווקא משום כך, ערכו של המסמך הוא בהצפת האתגר ובהעמדתו על שולחן עבודה מקצועי; להחליף קביעה של "תרחיש בסבירות נמוכה" בדיון מתודי; לבחון הנחות; להגדיר ולכמת יחסי תלות; לשפר בהדרגה את המודל באמצעות נתונים, תרגול ולמידה.

המטרה אינה לסגור את השיח אלא לפתוח אותו; לא "לפתור" את בעיית העלטה על הנייר, כתרגיל מחשבתי – אלא לכנס סביבו קהילת ידע ותפעול שתוכל לבנות שיטות וחוסן.

חלק מהדיון, מטעמי ביטחון ורגישות, יידרש להתקיים במרחבים סגורים; אך במקביל יש מרחב רעיוני, מעשי וחיוני שבו הדיון יכול וצריך להתנהל באור השמש – באופן שקוף ככל הניתן, שיתופי, בין-מגזרי, ומבוסס עובדות – כדי לחזק אמון, לשפר מוכנות, ולצמצם סיכונים מערכתיים לפני שאלו מתממשים.

תקציר מנהלים

בראשית עבודה זו עלינו להבחין בין "עלטה מלאה" (Blackout) לבין "עלטה חלקית" (Brownout) או קיצוב עומסים (Load Shedding). עלטה מלאה היא מצב בו היציבות המערכתית אובדת בהיקף רחב: חלקים משמעותיים ברשת יוצאים מסנכרון או מנותקים באמצעות מנגנוני הגנה, והחזרה לשגרה מחייבת שיקום מדורג, לעיתים תוך שימוש ביכולות "Black-Start" – התנעה של יחידות ייצור או מקטעי רשת באופן עצמאי, ללא תלות בכך שהרשת הארצית פעילה ומתייצבת.

לעומת זאת, עלטה חלקית (Brownout) עלולה להתרחש בשתי צורות שונות מהותית: היא עשויה להיות תוצאה בלתי רצויה של כשל (למשל ירידת מתח או ניתוק אזורי) או חבלה מכוונת (Sabotage), אך היא יכולה גם להיות כלי ניהול יזום ומבוקר שמטרתו למנוע קריסה רחבה. במצב כזה מפעיל המערכת מבצע ניתוק עומסים או הפחתת ביקוש בצורה מתוכננת, במטרה לשמור על יציבות התדר והמתח, לבודד בעיות לפני שהן מתפשטות, ולהגן על שלמות הרשת כולה.

חרף ההבחנה, עבודה זו אינה מצטמצמת לדיון בסוג אחד של עלטה, אלא בוחנת את "משפחת" תרחישי העלטה כרצף תפעולי (ספקטרום) שנע בין Brownout – ירידה חלקית באספקה, קיצוב עומסים, שיבוש מנוהל או בלתי-מנוהל בהיקף אזורי – לבין Blackout רחב היקף, בו היציבות המערכתית אובדת ונדרשות פעולות שיקום מדורגות ולעיתים גם יכולות Black-Start.

בלאו הכי, Brownout או קיצוב עומסים רחב ומתמשך – במיוחד כאשר הוא זולג בין אזורים ותשתיות; כאשר הוא מחולל או חופף לשיבושי תקשורת, אספקת מזון או מים; או כאשר הוא מלווה בפגיעה ביכולת השליטה והבקרה – עלול לגרום בפועל לתוצאות מערכתיות הדומות לאלה של Blackout; לא משום שהחשמל "נעלם לחלוטין", אלא משום שהמשק מאבד רציפות, יכולת תיאום, ותפקוד תשתיות קריטיות שמצטבר על פני ימים, שבוע ואף למעלה מכך.

יתירה מזאת, עבודה זו אינה עוסקת בסוג האירוע שחולל את העלטה (לשון אחר, אנו אדישים לסיבת המשבר, תקלה או חבלה), אלא מתמקדת בתוצאה התפקודית-פונקציונאלית, המגזרית והבין-מגזרית, לאורך זמן. ציר הזמן של 168-24 שעות, והניתוח הסקטוריאלי, אינם מיועדים לתאר את סיבת הקריסה, אלא למפות את דינמיקת ההשלכות וההתאוששות באירועי עלטה משמעותיים ומתמשכים – אירועים שמבחינת המשק מתבטאים בירידה ברמת השירות וביכולת הניהול. לכן, מבחינה אנליטית, המוקד של עבודה זו איננו השאלה "עלטה מלאה או עלטה חלקית", "עלטה במרכז או עלטה בצפון", או "האם העלטה היא תוצאה של אירוע גיאופיזי, מתקפה קינטית או קיברנטית", אלא שאלה מערכתיות: כיצד "מתנהג" כל סקטור לאורך זמן בתנאי היעדר אספקת חשמל, וכן, האם מתקיימת זליגת סיכונים בין-סקטוריאליים שמעצימה את השיבוש וההפרעה למשק ולחברה.

בעיקרה, העבודה מבקשת להציע מסגרת אחת שמאפשרת לנתח ולהיערך הן לקריסה מלאה והן לשיבוש חלקי ומתגלגל – לפי השפעותיו המצטברות, ספי הכשל, וקצב ההתאוששות בפועל של המערכת כולה.²

אירועי עלטה בעולם

הניסיון המצטבר מאירועי עלטה בעשור האחרון מחדד את ההבחנה בין "הגורם הראשוני" לבין "התוצאים המערכתיים". אירועי עלטה אינם מתפתחים באופן לינארי שבו עוצמת הטריגר "מתורגמת" באופן ישיר לעוצמת הנזק. להפך, לא אחת הטריגר נראה נקודתי או טכני – תקלה תפעולית, שגיאת הגנה או חדירה למערכת בקרה – אך מאחר שמערכות החשמל והתשתיות התלויות בה פועלות כמערכת משולבת, ההשפעות בפועל עלולות להתרחב במהירות, לחצות סקטורים, ולחולל השלכות שאינן נגזרות באופן פרופורציונלי מן האירוע ההתחלתי.

במצבים כאלה, השאלה המכריעה איננה "מה קרה בהתחלה", אלא "מה קורה בהמשך": האם הכשל נבלם ומבודד, או שהוא מתגלגל לרצף זליגות שמערער רציפות תפקודית כלל-משקית.

אירועי סייבר הפוגעים במערכות בקרה ממחישים זאת היטב. הפגיעה אינה חייבת להתחיל כלל בהשבתת יחידות ייצור חשמל או תחנות משנה; לעיתים היא מתחילה בשלילת יכולת הניהול, פגיעה ביכולת הפעלה מרחוק, שיבוש תקשורת תפעולית או קבלת החלטות. במצב כזה, היכולת לייצב את המערכת נפגעת, כשלים עלולים להתפשט, ופעולות השיקום מתארכות משום שלא ניתן להסתמך על אותם מנגנוני בקרה ושגרות תפעול שמאפשרים חזרה מבוקרת לשגרה.

בהקשר זה, פרסומים וניתוחים מקצועיים של גופי סייבר ותשתיות בארה"ב הצביעו על אירועי העלטה באוקראינה בשנת 2015 כנקודת מפנה בהבנת איום הסייבר על תשתיות חשמל: יכולת מבצעית של ישות עוינת שמסוגלת להוביל להשבתה תפעולית, לשבש ניהול אירוע בזמן אמת, ולחשוף פערי כשירות בתפעול ידני, בתקשורת, ובשיקום.

גם שיבושים ועלטות שלא נגרמו ממתקפות סייבר מדגימים את אותה דינמיקה. אירוע ספרד-פורטוגל באפריל 2025, כפי שתואר על ידי גופי רשת אירופיים ובדיווחים עיתונאיים בינלאומיים, הדגים דינמיקה של מפל סיכונים (cascade) ברשת חשמל מודרנית: אובדן הספק משמעותי בפרקי זמן קצרים יכול להתגלגל לשיבושים נרחבים בתחבורה, בתקשורת ובתפקוד תשתיות עירוניות, גם אם החזרת החשמל מתרחשת בתוך שעות ולא בתוך ימים.

כאן מתחדד לקח לניהול סיכונים. "משך ההשבתה" הוא מדד קריטי, אך הוא לא המדד היחיד לחומרת האירוע. די בשעות ספורות כדי לשבור רציפות של שירותים תלויי-חשמל, וכאשר אותם שירותים מחזיקים בגיבוי קצר-טווח בלבד, הנזק המצטבר נובע בעיקר ממה שמתרחש אחרי הכשל הראשוני – קצב התפשטות ההשפעות, איכות התיאום בין סקטורים, והיכולת להפעיל מנגנוני התאוששות לפני שהאירוע הופך ממקומי למערכתי.

עלטה בישראל: לא רק שאלה של הסתברות

בישראל, הדיון הציבורי סביב תרחישי עלטה נוטה להיערך בגבולות שאלת ההסתברות, ולעיתים מצטייר כעימות בין מי שמציג תרחיש קיצון (לעיתים רח"ל, לעיתים נגה מפעיל המערכת) לבין מי שמבקש להרגיע "ולהעמיד את הדברים בפרופורציה"³. אולם ניהול סיכונים וחוסן אינו מסתכם בקביעה בינארית של "סביר/לא סביר". גם כאשר ההסתברות נמוכה, עצם קיומו של סיכון בעל פוטנציאל פגיעה רחב מחייב מסגרת מקצועית לדון בשאלות אחרות, אופרטיביות, למשל, כיצד נשמרת רציפות תפקודית של שירותים חיוניים, כיצד מתעדפים שירותים ומשאבים תחת מחסור, היכן נמצאות נקודות התלות ההדדית בין סקטורים, ומהם לוחות הזמנים שבהם מערכות קורסות או מתאוששות.

במובן זה, השיח צריך לעבור ממחלוקת שטחית-מה על "כמה זה סביר" לדיון מתודולוגי של "מה עושים אם וכאשר", וכיצד מצמצמים נזק, מבודדים זליגות ומאיצים חזרה לשגרה. באותה רוח, עבודה זו מבקשת לסמן כמה נקודות תורפה, ולתרום לשפה משותפת של ניהול סיכונים באמצעות גישה אחידה, מתודית, מקצועית וצופה פני עתיד.

המודל המוצע כאן הוא מודל עניבת הפרפר, המכונה Bowtie. המודל משלב (1) זיהוי איומים (למשל מתקפת סייבר, מתקפה קינטית, או אירוע גיאופיזי), (2) מנגנונים למניעת או למצער בלימת איומים, (3) אנליזה של "אירוע העל" עצמו: אובדן אספקת חשמל בהיקף מסוים למשך זמן מסוים. מן האירוע נפרשים (4) מסלולי ההשלכות – הדרכים בהן עלטה מתגלגלת מתופעה הנדסית לכשל רב-מערכתי – תוך הדגשה של (5) אמצעים להתאוששות וחזרה לשגרה. בעבודה זו אנו מרחיבים את המודל לעסוק בתלות בין תשתיות ובמנגנוני זליגה.

אנו מנתחים, ניתוח ראשוני, את השלכות העלטה לאורך ציר זמן מובנה: 24, 48, 72, 96, 120, 144 ו-168 שעות. בכל סקטור נבחנים ספי זמן קריטיים, נקודות תלות במערכות אחרות, צרכים חיוניים בעת עלטה, פערי היערכות קיימים, וכן פתרונות מוכרים וחסמים ליישומם. כך מתקבלת מסגרת אחת שמאפשרת להשוות בין סקטורים, לזהות נקודות כשל משותפות, ולתרגם את הניתוח לתכנון חוסן (ראו תרשים 1).

מכאן נגזרת גם דרך הקריאה של הממצאים. ככל שמתקדמים לאורך ציר הזמן, נקודת הכובד ממשיכה לנוע מהשאלה "מה קרה ברשת החשמל" אל עבר השאלה "איזו רמת שירות מערכתית נשמרת בפועל, והיכן מתחילות דליגות סיכון בין סקטורים", וכן, מהו סף הזמן שבו תפקוד מגובה הופך לתפקוד מקוטע.

כך, אם בוחנים את השלכות אירוע העלטה לאחר שלוש יממות (72 שעות), מרבית הסקטורים לא קרסו לחלוטין, אך הם עברו ממצב של תפקוד מצומצם ומגובה למצב של תפקוד מקוטע, אי-יציבות ותלות גוברת בלוגיסטיקה, תקשורת ותדלוק (אשר חווים זעזועים ושיבושים בעצמם). במערכות תקשורת, חלונות הגיבוי הקצרים של אתרי קצה נשחקים ונוצרות "בועות" כיסוי בלתי-אחידות, כך שהבעיה העיקרית הוא לא עצם קיום רשת, אלא זמינותה למי, ובאיזו קיבולת – מה שעלול לערער את התיאום בין גופי חירום וניהול אירוע.

בתשתיות אספקת מים, לאחר 72 שעות הסיכון עובר משאלה של זמינות לשאלה של איכות ובטיחות. במקביל, במערכות טיפול בשפכים הצורך בטיפול רציף מגביר את הסיכון להצפות וזיהומים. במערכות חקלאות ומזון, חלון 72 השעות מסמן נקודת מפנה בין פגיעה בתוצרת טרייה (שנפגעת כבר ב-48-24 השעות הראשונות) לבין פגיעה בזרימת הסחורות: אמצעי קירור בלתי-זמינים בקנה מידה משקי ולאורך שרשראות אספקה (ביצים, בשר ומוצרי חלב), יכולת תשלום ותיאום נפגעות, נדרש מעבר מניהול משק לניהול הקצאה ותעדוף, במיוחד לאוכלוסיות פגיעות.

בתחבורה, לאחר 72 שעות, השיבוש הופך לצוואר בקבוק רב-מערכתי; כשל ברמזורים ומערכות ניהול ובקרה פוגעים בזרימת התנועה, בבטיחות ובתנועת כוחות חיוניים, יכולת התדלוק והטעינה החשמלית מצטמצמת בשל תלות משאבות בחשמל וקיבולת מוגבלת של תחנות מגובות, והיכולת לשנע דלק, חלפים וכוח אדם לסקטורים שונים נפגעת. אמנם, בישראל מאות תחנות דלק המוגדרות חיוניות, אך רק מקצתן בעלות גיבוי המאפשר רציפות תפקודית (אין בישראל תקנות היערכות נאותות שעשויות לחייב מפעלים חיוניים למשל לשמור על יכולת ייצור חשמל עצמאית ל-96-72 שעות). יש לקחת בחשבון כי בשנים הקרובות, היקף צי הרכב החשמלי הפרטי, האוטובוסים הציבוריים והאמצעים המסילתיים יתרחב, ואיתו תעמיק התלות באספקת חשמל סדירה ורציפה.

בבריאות, לאחר 72 שעות בתי החולים ממשיכים לפעול אך תוך תיעודף ברור למחלקות קריטיות ותוך שחיקה תפעולית: תלות בדלק לגנרטורים, תלות בגנרטורים בשרשרת האספקה של תרופות ודם, תלות בחשמל ממקורות אלטרנטיביים לתקשורת וניהול רשומות, ולתיאום. כל זאת בשעה ששירותי רפואה מרחוק, מרפאות קהילה וטיפול ביתי תלוי חשמל נפגעים ומגדילים עומס על בתי חולים.

בבנקאות ופיננסיים, לאחר 72 שעות נוצר פער בין "מערכת קיימת במרכז" לבין "מערכת נגישה בקצה": זמינות כספומטים, סליקה ותשלומים דיגיטליים מוגבלת עקב חשמל ותקשורת, מה שמגביל את יכולת התפקוד של מערכות קמעונאות, דלק ולוגיסטיקה, ומעצים לחץ ציבורי.

בקצרה, 72 שעות עלטה מסמנות מעבר ממצב "ניהול תקלות ומשברים" למצב "ניהול רציפות תפקודית", שבו מכפילי הסיכון – תקשורת, תחבורה, מים, מזון, ולוגיסטיקה – מכתיבים את קצב ההידרדרות או הבלימה של משבר כלל-מערכתי.

לאחר 168 שעות (שבוע), המערכת נוטה לעבור משיבוש לשיבוש חריף עד כדי משבר משקי כלל-מגזרי (לרבות משבר אמון וסדר ציבורי) המחייב שקלול תמורות חריף (tradeoff): גם אם החשמל חוזר חלקית, לא כל מערכת

חוזרת מיד לרמת שירות, משום שהבעיה כבר אינה רק אספקת אנרגיה אלא שחיקה מצטברת של לוגיסטיקה, כוח אדם, מלאים, תיאום ומערכות בקרה. במערכות תקשורת, שבוע של תפקוד מקוטע מייצר רשת של "איים" ותלות גוברת בפתרונות חלופיים מוגבלים (רדיו ו/או לוויין), והחזרה לשגרה דורשת תיקון, אתחול וסנכרון – כך שהתקשורת הופכת לתשתית התאוששות לא פחות משהיא תשתית תפקוד. במערכות מים וטיפול בשפכים, שבוע עלטה מגדיל את הסיכון לאירועי תברואה רחבי היקף: איכות מים, גלישות שפכים, ונזקים סביבתיים עלולים לדרוש טיפול מתמשך גם לאחר חזרת חשמל, וההתאוששות מחייבת בדיקות איכות, ניקוי קווים ושיקום בקרה, לא רק הפעלה מחדש של משאבות. במזון, שבוע של שיבושים גורר אובדן תוצרת חקלאית, צניחה בהיצע המזון (בין היתר בשל פאניקה והתנהגות עדרית), והעמקה של פערים חברתיים; ההתאוששות תלויה בהחזרת היכולת לייצר, לשנע ולשלם – כלומר חזרה משולבת של חשמל, תקשורת ופיננסיים. בתחבורה, שבוע עלטה יוצר פגיעה מתמשכת במסדרונות לוגיסטיים, בתדלוק ובתחזוקה, ומאריך את זמן החזרה לשגרה בגלל בדיקות בטיחות והצטברות תקלות; זו נקודת מפתח משום שהתחבורה קובעת בפועל את יכולת השיקום של כלל הסקטורים. בבריאות, שבוע עלטה מייצר סכנה ל"קריסה תפקודית": עומס יתר, פגיעה מתרחבת בשירותים רפואיים, שחיקה של צוותים וחוב טיפולי מצטבר, כאשר מים, תקשורת ותדלוק הופכים תנאי סף להמשך פעולה. בפיננסיים, שבוע של חוסר נגישות יוצר שיבוש באמון ובנזילות, הצטברות עסקאות ותקלות סליקה, והגברת תלות בפתרונות Fallback שאינם בהכרח זמינים בהיקף נדרש; גם כאן ההתאוששות דורשת סנכרון מערכות ובדיקות אבטחה, לא רק "חזרת חשמל".

לכן, מסקנת העל הנובעת מתרחיש "168 שעות העלטה" (ראו תרשים 1), היא שהסיכון המרכזי אינו "אפלה לכשעצמה" אלא המעבר למשבר רב-מערכתי שבו קצב ההתאוששות מוכתב על ידי צמתים משותפים – תקשורת, מים ודלק-לוגיסטיקה – ועל ידי היכולת לנהל סדרי עדיפויות, להבטיח שירות מינימלי, למנוע הפרות סדר ציבורי ומופעי אלימות, ולבלום זליגות בין סקטורים לפני שהן מייצרות נזק מצטבר ארוך-טווח.

על אף שמערכת החינוך (בדגש על פעוטונים, גנים ובתי ספר יסודיים) אינה נכללת בניתוח הסקטוריאלי בעבודה זו ותידרש לה עבודת המשך ייעודית, חשוב להצביע על תרומתה האפשרית לדינמיקת הסיכון המערכתית באירוע עלטה מתמשך. כבר בשעות הראשונות של עלטה, החלטה צפויה על סגירת מוסדות חינוך – בשל היעדר חשמל, בטיחות, תברואה, מיזוג ואוורור, ושיבושי תקשורת והסעות – מייצרת "גל משברים שניוני" שאינו טכני אלא חברתי-תפעולי. ילדים נשארים בבית, והורים נדרשים להישאר איתם או להסדיר חלופות שאינן זמינות בהיקף רחב. תוך 48-24 שעות, הדבר מתרגם לפגיעה בכוח העבודה במשק, ובעיקר בכוח אדם חיוני בסקטורים קריטיים (בריאות, תשתיות, לוגיסטיקה, רשויות מקומיות, שיטור וביטחון), שכן חלק מהעובדים אינם יכולים להגיע למשמרות או נאלצים לקצר שעות עבודה. לאחר 72 שעות, כאשר שיבושי תקשורת, תחבורה ותדלוק מעמיקים, החלופות הפרטיות (משפחה מורחבת, מסגרות קהילתיות, שירותי שמרטפות) מצטמצמות, והיעדר מסגרת חינוכית הופך ממטרד לנקודת לחץ מערכתית שמאיצה שחיקה של צוותים חיוניים ומקשה על יציבות התפקוד. בהמשך השבוע, ההשלכה מצטברת: לא רק ירידה בפריון ובזמינות עובדים, אלא גם העמקת פערים חברתיים, עלייה בעומס על מערכי רווחה וקהילה, ופגיעה בניהול האירוע עצמו, זאת משום שהמשק "מאבד ידיים עובדות" בדיוק בזמן שבו נדרש מאמץ שיקום מתואם. לכן, אף שהחינוך אינו נסקר כאן כסקטור בפני עצמו, הוא מתפקד כ"מכפיל סיכון" משמעותי דרך השפעתו על זמינות כוח אדם ועל כושר ההפעלה של שירותים חיוניים, ומכאן הצורך לכלול אותו באופן שיטתי בעבודות עתידיות כחלק מארכיטקטורת ניהול הסיכונים לעלטה.

אחת המסקנות העולות מהעבודה היא שהיקף העלטה – מלאה ומוחלטת, או חלקית; 60%, 50% או 40% (כמובן שטרם נשאלה השאלה 60% ממה ואיפה) – אין בה כדי לדחות ניהול סיכונים. גם עלטה אזורית, או חד-מערכתית עלולה להתרחב באמצעות מנגנוני זליגה (Spillover): שיבוש מקומי שגולש מסקטור לסקטור דרך תלות הדדית בין תשתיות ומערכות, עד כדי פגיעה מצטברת רחבת היקף.

במסלול כזה, מתחווים לנו "מכפילי סיכון" מערכתיים, בין היתר: כשלי תקשורת, מים ודלק-לוגיסטיקה. תקשורת היא תנאי יסוד לתיאום, לפיקוד ושליטה, ולהפעלה סדורה של צוותי תיקון וחירום; מים הם תנאי לבריאות הציבור, לתפקוד מוסדי ולשמירה על תברואה, בהיעדרם נוצרים סיכונים משניים שמכבידים על מערכת הבריאות והחירום; ודלק-לוגיסטיקה הוא תנאי להמשך הפעלת גיבוי (גנרטורים), לתנועת כוחות חירום, ולהבאת חלפים וכוח אדם לאתרים שנפגעו. במקביל, הניתוח מצביע על נקודות תורפה הנדסיות שמרימות את ראשן שוב ושוב: תחנות משנה ברשת ההולכה (תמ"ש), תחנות מיתוג (Switching Station), ותחנות השנאה או תחנות משנה משולבות להשנאה (Transformer Substation; המורידות מתח מהולכה לחלוקה). פגיעה בצמתים כאלה אינה "עוד תקלה" שניתן לעקוף במהירות, משום שלעיתים אין חלופה תפעולית זמינה, והשיקום דורש זמן, ציוד וכוח אדם – ולכן עלול להימשך ימים. מצב זה, עליו מצביעות עבודות קודמות, מתאר כיצד אירוע נקודתי יחסית יכול להפוך למשבר אזורי ובתורו, לחולל זליגת סיכונים בין-סקטוריאליים.

תרשים 1: התפתחות השלכות עלטה רחבת היקף לאורך זמן ובין סקטורים

| תקשורת | מים | תחבורה | בריאות | פיננסיים | |
|--|--|---|---|---|------------------|
| קריסת אינטרנט ביתי תקשורת ניידת: סיבים אופטיים אתרי הקצה סלולר | ירידה בלחץ המים באזורים תלויי שאיבה פגיעה באספקה בבניינים רבי קומות | השבתת רמזורים וירידה דרמטית בקיבולת הצמתים פגיעה בתאורת כבישים פגיעה במערכות בקרה ואיתות | מעבר בתי חולים לגנרטורים צמצום שירות במרפאות הקהילה ושירות מקוון ציוד רפואי ביתי תלוי חשמל | כספומטים, קופות, מסופים ועמדות שירות פגיעה ביכולת התשלום הדיגיטלי | 24 שעות |
| ירידה בשידורי ההסברה אתרי ליבה סלולאריים קטנים אתרי ביניים סלולאריים | הפסקות מים מקומיות שחיקה ההדרגתית ביכולת גיבוי תחנות שאיבה | עליה בתאונות דרכים מערכות מסילה, מנהרות וחניונים חכמים תנועת הרכבות | צמצום פעילות אלקטיבית ושירותים חיוניים עלייה בעומס על בתי החולים | פגיעה בתשלומי ספקים קישוריות בנקים, בתי השקעות וגופי סליקה צמצום מסחר ותונדטיות | 48 שעות |
| קריסת כיסוי סלולרי חלקית פגיעה בתיאום בין גופי חירום | שיבושים באספקת המים שיבושים במערכות כיבוי אש | תנועת אוטובוסים חשמליים משאבות דלק תלויות חשמל | תיאום בין מוסדות רפואיים ושירותי חירום יכולת ניהול תמונת מצב רפואית- אזורית | מיצוי רחבות מזמנים תשלומי פרמיות ביטוח קושי בקביעת שווי עדכני לכסים פיננסיים | 72 שעות |
| אתרי סלולר גדולים תקשורת ייעודית לכוחות חירום היוצרות בעות כיסוי | מתקני טיפול וניטור שפכים סיכון לגלישות ביוב נקודתיות אספקת מים לחקלאות, תעשייה בריאות | מערכות מסילה פריקה וטעינת מטענים ירידה בזמינות הדלק והשפעה על מערכי הובלה והצלה | פעילות שירותים תומכים: מעבדות, בדיקות עור והדמיה העברת מטופלים בין מוסדות בהתאם לזמינות משאבים | שיבושים בפעילות מערכות סליקה ותשלומים פגיעה בנגישות לשירותים פיננסיים דיגיטליים | 96 שעות |
| פגיעה בתחנות מיתוג ושידור שיבושי תקשורת ארגוני חירום | מחסור באזורים שאינם מגובים אספקת מים חלופית במוקדים רגישים | נמלים ושדות התעופה רכבים חשמליים | זינוק בביקוש לרפואה ובסיכוני תברואה מלאי תרופות, דם וציוד פגיעה בטיפול בחולים כרוניים | פגיעה במגזר הקמעונאי פגיעה בשרשראות האספקה | 120 שעות |
| החרפת פערים וצמצום יזום של כיסוי באזורים בלתי חיוניים צמצום נגישות לשירותים דיגיטליים | הצטברות נזקים תפעוליים ותברואתיים | תנועה אזרחית מעבר לניהול מסדרונות לוגיסטיים פערים בין אזורים שונים בנגישות ובאספקה | בתי מרקחת והפצת תרופות תיעודך אספקת תרופות לאוכלוסיות בסיכון | פגיעה תזרימית בעסקים קטנים דחיית תשלומי שכר וספקים התנהגות פיננסית מגוננת | 144 שעות |
| רשת של "איים" כשלי תקשורת מקומיים | פגיעה במערכות ניטור ובקרה | שיבוש משמעותי במסדרונות אספקה ארציים פגיעה בשירותים עירוניים כגון פינוי פסולת והובלת מים | עומס יתר על בתי החולים ומערכי החירום הצטברות תורים וניתוחים | בקרה ומניעת הונאה, חריגים ותפעול מרחוק צמצום שירותים, הגבלת עסקאות והעלאת ספי אימות ואישור | 168 שעות |
| התאוששות מצריכה בדיקות איכות מים וחייטי קווי שיקום מתקנים ומערכות בקרה | התאוששות מצריכה ניטור ובקרה | שיבוש מערכי בדיקה התאוששות מצריכה בדיקת תשתיות, סנכרון מחדש של מערכות בקרה וניהול תנועה | עודף תחלואה ותמותה תלות בסנכרון מערכות מידע | הצטברות עסקאות שלא בוצעו והתאמות סליקה שיבושים בחוזי אספקה ותשלומים בין-עסקיים | +168 שעות |

האם אנחנו ערוכים?

כאן חשוב להדגיש: בחלון זמן של 168 שעות, איכות הממשל והניהול הציבורי הופכת למרכיב תשתיתי קריטי. היא זו שקובעת אם המשק מצליח לנהל סדרי עדיפויות, לתאם בין גופים ורשויות, להפעיל לוגיטיקה לאומית ולבלום זליגות סיכון, או שהוא נשאב להידרדרות שמקורה אינו רק במחסור פיזי אלא באי-תיאום, מסרים סותרים, פאניקה והתנהגות עדרית, ופערי אחריות.

בשבוע של עלטה ושיבוש, נדרשים מנגנוני פיקוד ושליטה מתפקדים גם תחת תקשורת מוגבלת; יכולת לתרגם תמונת מצב חלקית להחלטות הקצאה ותיעדוף בין סקטורים ובין אוכלוסיות; תיאום הדוק בין ממשלה, רשויות מקומיות ומפעילי תשתיות; והפעלה עקבית של מערכי מידע לציבור כדי לשמר אמון ושיתוף פעולה סביב קיצוב, הגבלות, ונהלי חירום.

אמנם, לרשות המדינה מנגנונים שונים לניהול אירועי עלטה לרבות ניהול ביקושים, בידוד אזורים ברשת, הפעלה מדורגת של מקורות ייצור, ומתן מענה מקומי באמצעות תשתיות גיבוי. מנגנונים אלה נועדו לצמצם את היקף הפגיעה, ולאפשר רציפות תפקודית חלקית. יחד עם זאת, יעילותם של מנגנונים אלה תלויה בתפקוד מערכות תומכות, בראשן תקשורת ואספקת דלק, המחייבות בתורן ניהול ציבורי מעולה, צופה פני עתיד, ומהיר-תגובה.

במובן זה, ולאור אירועי ה-7 באוקטובר 2023 והכשלים שנחשפו סביב מהירות התגובה, התיאום והביצוע, מתבקשת שאלה מקצועיות בלתי נמנעת: האם מערכי קבלת ההחלטות והיישום הממשלתיים, הבין-משרדיים ובין-רשותיים ערוכים לעומס המתמשך הצפוי במקרה של עלטה רב-מערכתית, או שיידרשו התאמות מבניות ותהליכיות מבעוד מועד במטרה להבטיח כושר תפקוד לאומי בתרחיש עלטה ממושך?

חלק ראשון: יסודות, הקשר, מתודולוגיה

פרק 1: מהי עלטה, ניסיון במקרי עלטה בעולם

שומה עלינו להבין את תופעת העלטה כראוי. עלטה איננה רק "הפסקת חשמל" במובן היומיומי. רשת חשמל מודרנית היא מערכת דינמית, שבה בכל רגע חייב להתקיים איזון בין ההספק המוזרם לרשת לבין ההספק הנצרך (כולל הפסדי הולכה וחלוקה), כדי לשמור על תדר תקין ועל יציבות מערכתית; במקביל, ניהול המתח תלוי גם בזמינות ובשליטה בהספק תגובתי, ולכן יציבות המערכת היא תוצאה של שילוב בין איזון תדר לבין בקרת מתח ויכולת דינמית להתמודד עם הפרעות.

כאשר מתרחשת תקלה או הפרעה משמעותית – בייצור, בהולכה, בחלוקה – מערכת ההגנות והבקרה של הרשת (ממסרי הגנה, מפסקים, ויסות ייצור ומערכות EMS/SCADA) פועלת במהירות כדי לבלום נזק ולהגן על יציבות המערכת. ההגנות מבצעות ניתוק אוטומטי של רכיבים תקולים או של מקטעים ברשת במטרה לבודד את התקלה, ובמקביל מנהל המערכת עשוי להפעיל צעדים תפעוליים כגון ניתוק עומסים (load shedding) להפחתת ביקוש, הפרדת אזורים, שינוי טופולוגיה והזרמת הספק במסלולים חלופיים – הכל כדי לייצב תדר ומתח. כאשר פעולות אלה מצליחות להשאיר את האירוע בתוך "מעטפת שליטה", התוצאה היא שיבוש חלקי: ירידת רמת שירות, קיצוב עומסים או Brownout, שנועדו לשמר את שלמות הרשת ולמנוע קריסה כוללת.

לעומת זאת, כאשר ההפרעה חוצה את סף היציבות – למשל עקב אובדן תצפית ושליטה (loss of visibility/control), כשל בתיאום ובניתוב זרימות, טריפינג סדרתי של קווים ויחידות ייצור (ניתוק אוטומטי או יזום של רכיב ברשת החשמל), או קריסה מהירה של מתח ותדר – המערכת עלולה להידרדר ל-Blackout: מקטעים גדולים מתנתקים זה מזה או "נופלים" בשל מנגנוני הגנה, והחזרה לשגרה מחייבת שיקום מדורג של הרשת (system restoration) הכולל החזרת מתח (re-energization), בניית איים יציבים (islanding), וסנכרון הדרגתי בין מקטעים.⁴

חשוב להדגיש כי הספרות והפרקטיקה אינן משרטטות קו חד בין Brownout או קיצוב עומסים לבין Blackout. המעבר הוא הדרגתי ונקבע ככל הנראה בדיעבד לפי היקף הניתוק, משכו, ואובדן היכולת לשמר יציבות ולנהל את האירוע בזמן אמת. במובן זה, הניסיון להבחין בין השניים מזכיר את "פרדוקס הערימה" (כמה גרגירי חול עושים ערימה) – לא משום שמדובר בשאלה פילוסופית לשמה, אלא משום שבמערכות מורכבות יש טווח שאינו מתחיל ומסתיים בנקודה אחת, או על-ידי סימן אחד, אלא על-ידי שילוב תנאים.

כך או אחרת, במקרים של אובדן מתח נרחב, תחילת השיקום נשענת בין היתר על יכולות Black-Start – יחידות ייצור או מערכות אגירה המסוגלות להניע את עצמן ולהזין עומסים ושירותי עזר ללא תלות ברשת פעילה – עד ליצירת "שלד" רשת יציב שממנו ניתן להרחיב בהדרגה את האספקה.

מקרי מבחן מהעשור האחרון מבהירים בו-זמנית שני דברים: הטריגרים לאירועי עלטה מגוונים, אך התוצאות המערכתיות נוטות לדמיון. זאת משום העובדה שחשמל משמש תנאי בסיס לתפקודן של תשתיות ושירותים חיוניים, ואלו דומים זה לזה.

באוקראינה (2015), אירוע מתקפת הסייבר המחיש כיצד פגיעה ממוקדת במערכות תפעוליות-תעשייתיות (OT) ובמערכות שליטה ובקרה (SCADA) יכולה להפוך אובדן שליטה לכשל אספקה. תוקפים הצליחו להשפיע על פעולת תחנות משנה והובילו להפסקת חשמל למאות אלפי איש למשך שעות. מעבר להשבתה עצמה, האירוע הדגיש שהגורמים שקובעים את משך ההתאוששות ואת היקף הנזק אינם רק "ציוד ומכונות" אלא גם כשירות תפעולית תחת תנאי אי-ודאות ולחץ. המערכת עמדה למבחן: האם יש יכולת לעבור במהירות לתפעול ידני, האם מוקדי השליטה ממישיכים לתפקד, האם קיימת תקשורת תפעולית אמינה בין צוותים בשטח למרכזי הניהול, האם יש זמינות של כוח אדם מיומן וחלפים, והאם ניתן לבצע שיקום מדורג ובטוח מבלי לייצר תקלות משניות.⁵ מכאן נגזר

לקח מרכזי לניהול סיכונים: התקפת סייבר אינו רק איום "לפני" אירוע, היא עלולה להשפיע גם על יכולת הפיקוד, השליטה וההתאוששות בזמן אמת, ולפיכך היבט זה הוא חלק אינטגרלי ממכלול החוסן התפעולי.^{7,6}

עשור לאחר מכן, אירוע העלטה בספרד-פורטוגל (2025) המחיש דינמיקה אחרת; כיצד, ברשת חשמל מודרנית, אובדן משמעותי של הספק בפרקי זמן קצרים מאוד – מדקות ועד שעות בודדות – אשר עלה על יכולת התגובה של מנגנוני האיזון והזרבות במערכת, מתגלגל במהירות לשיבושים רחבים בשירותים אזרחיים. גם כאשר השיקום החשמלי עצמו מתרחש בתוך כמה שעות ועד יממה בקירוב, ההשלכות המיידיות הן רב-סקטוריאליות: פגיעה בתחבורה מסילתית ועירונית, שיבושים בתקשורת סלולרית ובאינטרנט, תקלות תפעוליות במבנים (לרבות מעליות), וקושי בביצוע תשלומים ובשמירת רציפות של פעילות עירונית; בשירותי בריאות, חינוך ועוד.⁸ הלקח המרכזי הוא שהמדד המכריע אינו רק "כמה זמן לקח להחזיר את החשמל", אלא כמה זמן הסקטורים יכולים להחזיק רמת שירות סבירה ללא רשת יציבה. בחברה מודרנית גם חלון של "שעתיים-שלוש" עלול להפוך אירוע הנדסי קצר יחסית למשבר לאומי ולחייב ניהול חירום, משום שמערכות רבות נשענות על גיבוי קצר-טווח בלבד, והפער בין הפסקת חשמל קצרה לבין שיבוש תפקודי משמעותי נסגר מהר.⁹

להשלים את תמונת העשור האחרון, ואת תמונת הסיכונים, אירועי מזג אוויר קיצוני בטקסס (2021) המחישו עיקרון תשתיתי: כאשר אירוע קיצון "פוגש" פגיעות מערכתיות – שחיקה בהולכה ובחלוקה, מוכנות חלקית של ציוד לתנאי קיצון, מגבלות דלק, וקושי לשמר רציפות כוח אדם ותפעול – התוצאה עלולה להפוך מאירוע נקודתי למשבר מתמשך.^{10,11} בתנאים כאלה מתפתחות זליגות סיכון והפרעות; שיבושי חשמל מחמירים פגיעה במים, פגיעה במים מחמירה עומסים על בריאות ועל רווחה, ושיבושי לוגיסטיקה ודלק מאריכים את זמן ההתאוששות. המסקנה הרלוונטית היא שהחוסן אינו תלוי רק בתכנון חשמלי "צר", אלא ביכולת לנהל את הממשקים בין אנרגיה, לוגיסטיקה, כוח אדם ותשתיות נלוות.¹²

כאמור לעיל, ישנה קטגוריה משלימה של "עלטה חלקית יזומה" לפיה הפסקות חשמל אינן תמיד כשל, אלא עשויות להיות כלי ניהול סיכון. מדיניות PSPS בקליפורניה (ניתוקים יזומים להפחתת סיכון לשריפות) מדגימה כיצד Brownout מנוהל יכול לצמצם סיכון מערכתי מסוג אחד (התלקחות שריפות) אך במחיר תפקודי משמעותי: פגיעה ברמזורים ובבטיחות בדרכים, תפעול מבנים, קירור מזון, שירותי בריאות קהילתיים ותשלומים, ולעיתים גם שחיקה מצטברת באמון הציבור וביכולת התכנון של עסקים ומשקי בית. מכאן עולה שיעור מרכזי לניהול חוסן: גם כאשר ההפסקה "יזומה" ומנוהלת, המשק זקוק לתוכנית רציפות תפקודית ולהפעלה מתואמת של שירות מינימלי; אחרת הנזק המצטבר עלול להיות גבוה, וכלי ניהול הסיכון עצמו עלול להפוך לגורם סיכון משני.¹³

פרק 2: היעדר התייחסות שיטתית להשלכות עלטה בישראל

מדוע תופעת העלטה כאירוע לאומי, רב-מגזרי, מתקשה לקבל מסגרת מתודית אחידה בישראל?

הסיבות לכך אינן רק "חוסר ידע", אלא בעיקר מאפיינים מבניים של התחום ושל סביבת הממשל והתפעול שבה התופעה מנוהלת. ראשית, חלק מן הידע התפעולי הקריטי – ובפרט סביב נקודות תורפה ברשת, תצורות הולכה, פרטי הגנות, נהלי שיקום, ותלות במערכות בקרה – נוגע ישירות לביטחון לאומי, ולעיתים ידע זה, מטבעו, נשמר ברמות שונות של רגישות. התוצאה היא שקשה לייצר שיח ציבורי-מקצועי פתוח שמכסה את מלוא המרחב הנדרש לניהול סיכונים.

שנית, האחריות על חוסן מערכת החשמל ועל תפקוד המשק בשעת חירום מפוצלת בין מוסדות רבים: משרדי ממשלה, רגולטור ומנהל המערכת, חברת החשמל, יצרנים פרטיים, ספקים וירטואליים, ותשתיות משלימות, לצד גופי חירום (למשל רח"ל) ורשויות מקומיות. כל מוסד וארגון פועל במסגרת סמכויותיו, משאביו ותקציביו, ולכן נוטה

לנהל ולמצער למזער את הסיכון "במגרש שלו" – אבל אופטימיזציה מקומית אינה שקולה לניהול סיכון מערכתי, ובוודאי לא לניהול זליגות בין סקטורים.

פיצול מגזרי ומוסדי זה אינו רק מאפיין ארגוני, אלא גם מקור לפערי תיאום בזמן אמת. בהיעדר מנגנון מחייב ומתכלל לניהול רציפות תפקודית בין-סקטוריאלי, כל גוף נוטה לפעול במסגרת תחום אחריותו ומשאביו, לעיתים ללא שפה אופרטיבית אחידה המגדירה מראש תפקידים, סדרי עדיפויות וסמכויות בעת חירום. במובן זה, מתחדד פער בין "אחריות" לבין "יכולת אחיפה ותיאום". גם כאשר קיימות תוכניות היערכות מגזריות, קשה להבטיח שהן מסונכרנות זו עם זו. פער זה נדון לעיתים בהקשר של הצורך במסגרת מוסדית או חקיקה ייעודית (למשל, "חוק עורף"), שתגדיר סמכויות, אחריות ואכיפה במצבי חירום לאומיים, לרבות אירועי עלטה.

שלישית, ישנה נטייה מקצועית וציבורית להתמקד במה שקל יחסית למדוד, לתקצב ולהציג "לפני האירוע": עתודות ייצור, תוספת קווים, תכניות מיגון ותרגילים הנדסיים. מנגד, המורכבות של "אחרי האירוע" נדחקה לשוליים משום שזו נוחה פחות למדידה, אך דווקא שם מוכרע תפקוד המשק: כיצד מתעדיפים שירותים בתנאי מחסור, כיצד מנהלים מידע לציבור כאשר ערוצי התקשורת מוגבלים, כיצד מחזיקים לוגיסטיקה של דלק וחלפים כאשר תחבורה ותדלוק נפגעים, וכיצד מונעים שחיקה והידרדרות תפקודית לאורך רצף של שעות וימים.

אם כן, היעדר מתודולוגיה אינטגרטיבית, היעדר מודל כוללני ואופרטיבי עבור ישראל, אינם פערים תיאורטיים גרידא; הם גוררים ניהול סיכונים חלקי, מבודד ועל כן כזה שמפספס שתי תופעות יסוד האופייניות לאירועי עלטה. התופעה הראשונה היא מכפילי סיכון (compounding risks); מצבים בהם כמה גורמי לחץ מתרחשים בעת ובעונה אחת ומחזקים (מחריפים) זה את זה – למשל עומס שיא יחד עם אירוע אקלימי קיצוני, תקלה טכנית, פגיעה פיזית או מתקפת סייבר. כך, התוצאה אינה "סכום" של תקלות, אלא זינוק ב"איכות" המשבר ועוצמתו: ירידת רמת שירות חדה, התארכות זמן התאוששות, ופגיעה עמוקה ביכולת הניהול.

התופעה השנייה היא "מפל הסיכונים" (cascading risks) – מנגנון התפשטות שבו כשל בסקטור אחד חוצה במהירות לסקטור שני דרך נקודות תלות, ולעיתים ממשיך להתגלגל הלאה. בהקשר זה, עבודות קודמות על תלות בין תשתיות מדגישים חזר והדגיש את ההיגיון הפשוט אך הקשה ליישום: תשתיות קריטיות אינן פועלות בבידוד, ולכן פגיעה באחת מהן עלולה ליצור שיבושים רחביים – לרבות בפיננסיים, באספקת מים, בתקשורת ובשירותי חירום – גם כאשר התקלה הראשונית נראית מקומית.¹⁴

מכאן נגזרת גם המשמעות הפרקטית. כאשר אין שפה מתודית משותפת, הסקטורים הרלוונטיים אינם בהכרח "מוזמנים לשולחן" באותו זמן, ובאותה תשתית מושגית. הפערים נוצרים בדיוק בממשקים אלו. אם מערכת החשמל מתכננת "יציאה ממצב עלטה" בלי תיאום הדוק עם תקשורת, מים, מזון, בנקאות ובריאות, היא עלולה להחזיר אספקה חשמלית פיזית אך לא להחזיר תפקוד משקי – מפני שהשירותים התלויים בנתונים, בבקרה, במים או בלוגיסטיקה אינם מסוגלים להתאושש בקצב דומה.

באותו אופן, אם מערכת הבריאות מתבססת על גנרטורים אך אינה מתכננת תרחיש של מחסור דלק ארוך-טווח, מענה לסוגיות לוגיסטיות הנגזרות מכך ואינה מבטיחה תקשורת תפעולית רציפה, היא עלולה לחוות קריסה תפקודית גם כאשר "יש חשמל מקומי".

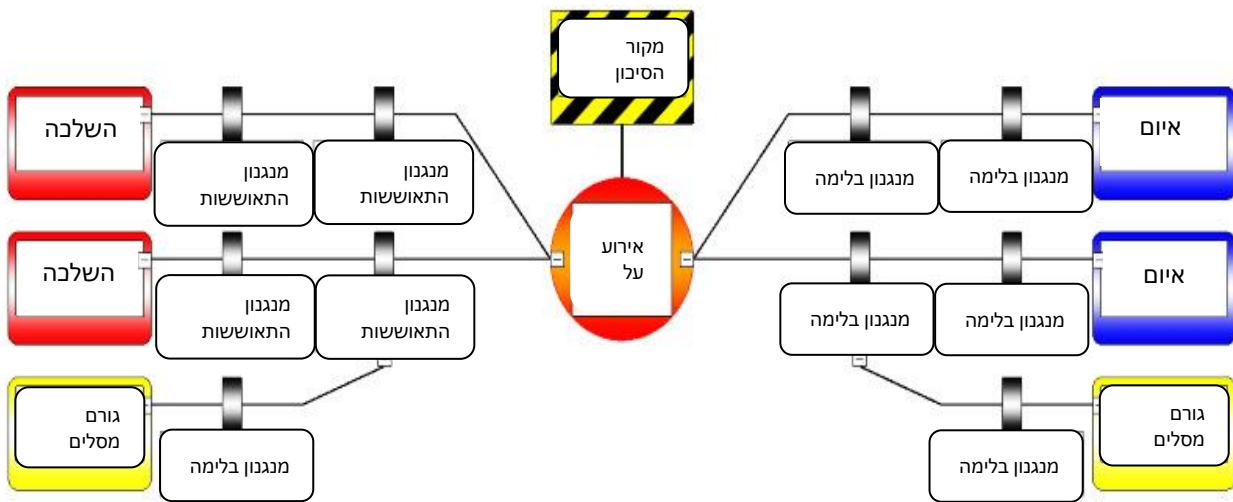
לכן, וכפי שמדגישים מוסדות וארגונים שונים מעת לעת, נדרש מעבר לשפה משותפת המבוססת על תרחישי ייחוס, בצד מדידה של רמות תפקוד בזמן חירום ותיאום בין-סקטוריאלי, זאת כדי לבנות חוסן שיתופי-קולקטיבי שמסוגל למנוע קריסה, ובעת הצורך, לקצר את זמן ההתאוששות ולבלום זליגות לפני שאלו הופכות לבעיה כלל-מערכתית.

פרק 3: מתודולוגיה – אופרציונליזציה של מודל עניבת הפרפר (bowtie)

מודל עניבת הפרפר הוא מודל תיאורי (descriptive) יעיל לזיהוי וניהול סיכונים, במיוחד במקרים שנדרשים "לפרק" בפעם הראשונה תופעה רחבה ורב-ממדית – כמו עלטה – לתופעות משנה, גורמים ומחוללים, השלכות והשלכות-משנה, ומסגרת לתמיכה בקבלת החלטות.^{17,16,15}

המודל פשוט בעיקרו: מגדירים במרכז הדיאגרמה – המכונה גם דיאגרמת Bowtie – "אירוע-על" (event) ברור ומדיד, וממקמים מימינו ומשמאלו את מכלול גורמי הסיכון והשלכות.

תרשים 2: מודל עניבת פרפר לניהול סיכונים (מימין לשמאל): איומים, מנגנוני בלימה, אירוע סיכון עיקרי (אירוע העל), מנגנוני התאוששות, השלכות.



בצד הימני של המודל מופיעים האיומים והטריגרים (threats, event-triggers) שעלולים להוביל להתרחשות אירוע העל, למשל אירוע עלטה. בצד השמאלי של המודל רשומות ההשלכות (consequences) שנגזרות מהאירוע לאחר התרחשותו.

בשני הצדדים מוצבים מנגנוני "שיכוך ובלימה" (barriers/buffers). בצד הימני, הבלמים מייצגים מנגנוני מניעה (prevention), שמטרתם להקטין הסתברות להתרחשות האירוע או לשכך את עוצמתו. בצד השמאלי, הבלמים מייצגים מנגנוני התאוששות (recovery) שמטרתם לצמצם את עוצמת ההשלכות, לקצר את משך ההשלכות, לבלום זליגה של הפרעות ושיבושים (cascading) ולהאיץ חזרה את המערכות השונות לשגרת תפקוד.

יתרון מרכזי של המודל הוא בכך שהוא מוסיף על רשימת הסיכונים הידועה, ומחייב אותנו לנסח ניסוח אופרטיבי את ההשלכות השונות: מה בדיוק עלול להתרחש, באיזו מערכת ותת מערכת, היכן אפשר להתערב, ובאיזה אופן. בעבודה זו, אנו מסיטים את מרכז הכובד במודל לצד ההשלכות (לשון אחר, אנו עוסקים בצד "שלאחר התממשות האירוע" ולא "לפני התרחשות האירוע").

אין בכך להמעט מחשיבות האיומים; אדרבא, בתחום האיומים – כשלים טכניים, מתקפות סייבר סיכונים קינטיים, אירועים גיאופיזיים או אקלימיים – קיימת ספרות ענפה, ניסיון מקצועי ומסגרות רגולטוריות. אולם בהקשר הישראלי, ובמיוחד בשיח הציבורי סביב תרחישי ייחוס, הפער המהותי נוטה להופיע דווקא במקום שבו נבחנת כשירות המשק לאחר שכבר התרחשה השבתה של הרשת.

בהתאם לכך, המודל בעבודה זו מופעל באופן הבא: אנו מניחים עלטה כאירוע-על (אובדן אספקת חשמל בהיקף רחב, למשך ימים) כך שניתן לבחון את השפעותיה על-ובין-סקטורים, תשתיות ומערכות חיוניות.

עבור כל סקטור אנו בוחנים את רצף השפעות בחלונות זמן קבועים של 24 עד 168 שעות (יממה עד שבוע), תוך איתור ספי זמן טנטטיביים של כשל תפקודי (כלומר מתי תפקוד "מגובה" הופך לתפקוד מקוטע או בלתי אפשרי), זיהוי תלות במערכות אחרות (תקשורת, מים, מזון, תחבורה), ומיפוי צרכים קריטיים (כוח אדם, דלק, חלפים, מידע).

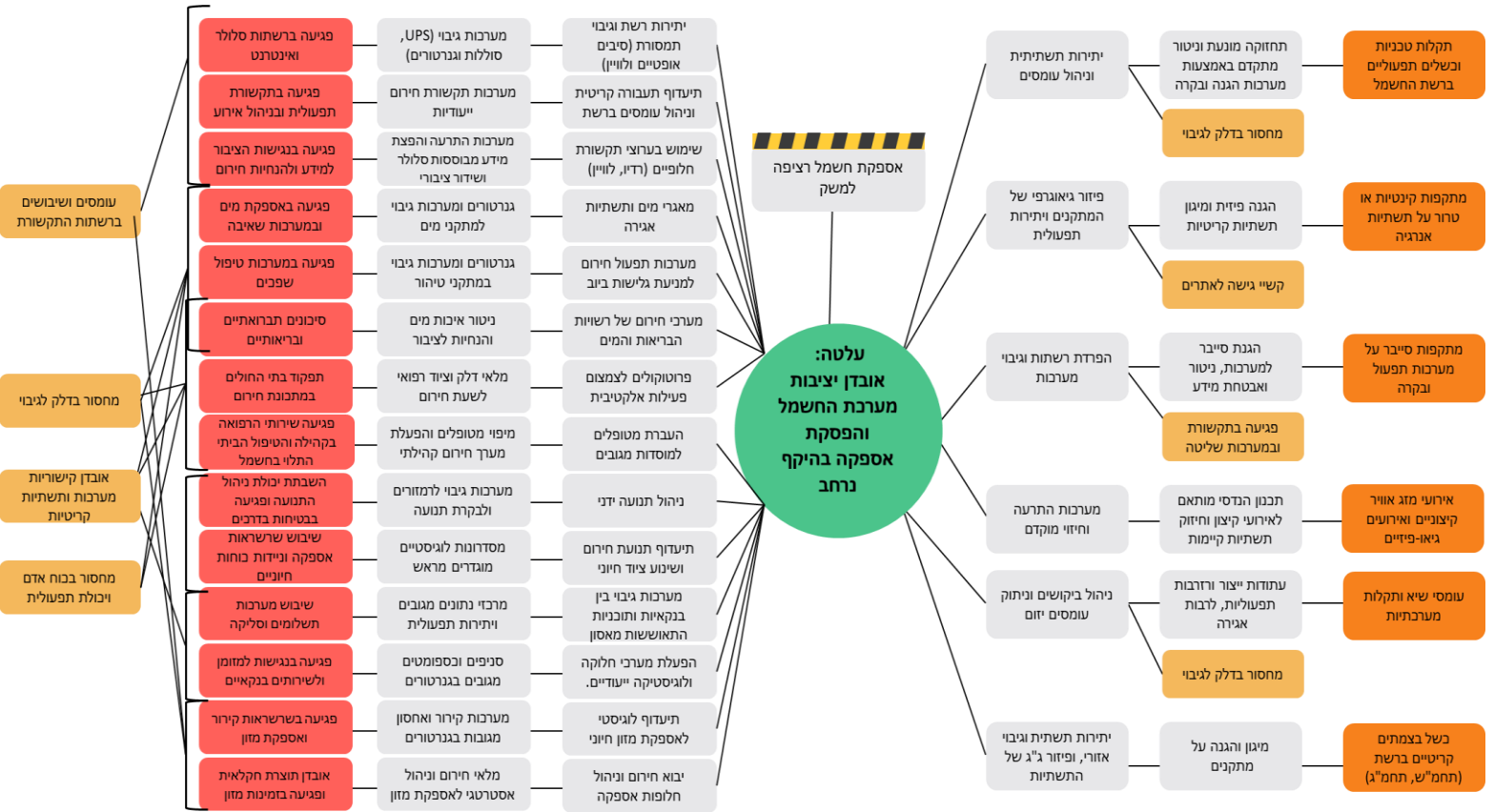
בסוף הדיון בכל סקטור מוצגת תמצית ההשלכות: מה האיומים העיקריים הרלוונטיים לסקטור, מהם אירועי-העל הסקטוריאליים (למשל "קריסה תפקודית של תקשורת עם הציבור" או "אובדן אספקת מים בלחץ"), מה ההשלכות העיקריות, ומה המנגנונים החיוניים באמצעותם ניתן למנוע התדרדרות, ולהאיץ התאוששות.

חשוב להדגיש, מטרת העבודה אינה "להבהיל". מטרתנו היא להחליף עמימות בידע ותרחישים. התכלית היא להציג שפה אחידה, ומסגרת כוללנית, שמאפשרת לדיון הציבורי והמוסדי לעבור מהצהרות כלליות למסגרת שיטתית יישומית – כזו שמכירה באי-ודאות ובכך שלא כל תרחיש ניתן לחיזוי מלא, אך מנהלת את אי-הוודאות באמצעות תרחישי ייחוס, תיעודף מערכות ושירותים חיוניים, הגדרת רמות שירות מינימליות, תרגול רב-סקטוריאלי, והיערכות לוגיסטית ותפעולית לתנאי "תפקוד מוגבל" לאורך זמן.

במובן זה, מודל עניבת הפרפר משמש לא רק ככלי גרפי (דיאגרמה), אלא כמתודולוגיית עבודה: הוא מייצר עץ החלטות ומסייע לזהות היכן להשקיע במנגנוני מניעה, היכן לעבות מנגנוני מיתון ושיכוך, וכיצד לנהל את "היום שאחרי", כך שאירוע הנדסי-רשתי לא יוביל לקריסה רב-מערכתית מתמשכת.

התרשים שלהלן (תרשים 3) מציג את המסגרת המתודולוגית לניתוח הסיכונים בעבודה זו, המבוססת על מודל עניבת הפרפר. הוא ממחיש את שרשרת הסיכון – מגורמי האיום ועד להשלכות המערכתיות של אירוע עלטה רחב היקף – ואת מחסומי המניעה וההתאוששות שנבחנו. התרשים מהווה הצגה מסכמת בלבד; לניתוח מפורט של כל סקטור ושל התלות ההדדית ביניהם, יש לעיין בפרקים הייעודיים בדוח.

תרשים 3: ניתוח סיכונים מערכתי של אירוע עלטה רחב היקף באמצעות מודל עניבת הפרפר



פרק 4: סיכונים, סבירות, ונזק של אירועי עלטה מלאים וחלקיים בישראל

כאשר עוסקים בסיכון לעלטה, עלינו להבחין בין הסתברות ההתרחשות (probability) לבין חומרת ההשפעה (severity, magnitude). תרחיש יכול להיות מוגדר "קיצוני ובעל סבירות נמוכה", כפי שנוסח לעיתים על ידי רשויות הממשלה בהודעות לתקשורת או על במות כנסים, ובכל זאת להצדיק היערכות.

השדה המקצועי מכיר בסיכונים מסוג זה, ואף מייעד להם אנליזות מעמיקות תחת הקטגוריה:

Low-Probability, High-Impact (LPHI) risk

– או –

Low-Likelihood, High-Consequence (LLHC) risk

לאור פוטנציאל הנזק, כאן הדגש הוא על הבנה, מניעה וניהול של השלכות, ולא רק על חישוב התוחלת. לשון אחר, כדי לנהל סיכוני עלטה מסוג "הסתברות נמוכה – נזק גבוה" (LLHC/LPHI) חשוב להבחין בין שתי שאלות שונות: מה הסיכוי שהאירוע יתרחש, ומה תהיה חומרת הנזק אם וכאשר יתרחש (והאם הנזק נסבל; אמפירית ונורמטיבית).

בעוד כלים בסיסיים כמו "הסתברות \times נזק" (כלומר תוחלת נזק) מועילים לתרחישים מסוימים, הם עלולים להטעות כשמדובר באירועי קצה: אירוע נדיר יחסית עלול להיראות "זניח" בחישובי תוחלת, אך אם יתממש הוא עלול לשבור רציפות תפקודית של כלל המשק ולחולל נזק מצטבר משמעותי לטווח ארוך.⁷

לכן, לאחר השימוש במודל עניבת הפרפר בעבודה זו, ניתן – בשלבים מתקדמים יותר – להוסיף אנליזות ששמות דגש בזנב הסיכונים ובקו האדום, הבלתי-נסבל, של הנזק.

שתי משפחות מדדים מאפשרות לעשות זאת בצורה ישירה וברורה. האחת היא מדדי "זנב" דוגמת CVaR (Conditional Value at Risk), שמודדים את חומרת הנזק בתרחישים הגרועים ביותר בכל מערכת ומגדר (למשל "מהו הנזק הממוצע בקרב ה-1% העליון של התרחישים לפי גודל הנזק").¹⁸

פורמלית, אם נסמן את הנזק/הפסד הכולל באירוע כ- L (Loss) אז מדד הזנב ברמת קיצון α מוגדר כך:

$$CVaR_\alpha(L) = E[L | L \geq VaR_\alpha(L)]$$

כאשר L מייצג את הנזק/הפסד כתוצאה מאירוע (למשל, שעות אדם אבודות, מספר אנשים ללא מי שתייה, או כל מדד נזק אחר), E מייצג תוחלת (ממוצע סטטיסטי של המשתנה בתנאי אי-ודאות ותרחישים אפשריים שונים), הקו האנכי מייצג תנאי (כלומר חישוב התוחלת בתנאי שסיכון התממש), הביטוי $VaR_\alpha(L)$ מייצג את "סף הזנב" (הערך שמעליו נמצאים $1 - \alpha$ התרחישים הגרועים ביותר, למשל $VaR_{0.99}(L)$ מבטא את סף הנזק שמעליו נמצאים 1% התרחישים הגרועים ביותר), ו- $CVaR_\alpha(L)$ הוא הנזק הממוצע בתוך אותם תרחישי קצה.

במילים אחרות, המדד מגדיר את ממוצע הנזק L רק בתוך התרחישים בהם הנזק גדול מספיק כדי להיות בזנב (כלומר, רק בתרחישים הגרועים ביותר).

⁷ יש שמכנים תרחישי קצה כאלה "ברבורים שחורים", אך אם אנו קפדנים, המונח שמור בעיקר לאירועים בעלי ממד של אי-צפיפות (unpredictability / un-foreseeability); בענייננו, רבים מן התרחישים המתוארים בעבודה זו הם דווקא קיצוניים אך מוכרים, ולכן נכון לתארם כאירועי קצה בעלי נזק מערכתי פוטנציאלי משמעותי.

הגישה השנייה היא גישת "סף קטסטרופלי", שמגדירה מראש קו אדום של תפקוד – למשל "אובדן אספקת מים לשתייה ל-100 אלף תושבים ברבי קומות התלויים במשאבות חשמליות מעל 24 שעות", או "קריסה תפקודית של תקשורת חירום ארצית" – ומבקשת לוודא שההסתברות לחציית הסף הזה נמוכה מאוד.¹⁹

באופן פורמלי, אם נסמן סף קריטי של נזק/אי-תפקוד כ- L_{crit} , ונסמן את רמת הסבילות (הסיכוי המקסימלי המותר) כ- ε ניתן לנסח זאת כך:

$$\varepsilon \geq \Pr(L \geq L_{crit})$$

במילים פשוטות, אנחנו מוכנים "לסבול" רק הסתברות זעירה (Probability) לכך שהמערכת תגיע למצב בלתי-קביל.

חשוב להדגיש שהפורמליזציה הזו אינה מחליפה שיקול דעת אנושי. אדרבא, היא מחייבת אותו להיות מפורש ושקוף. המקדמים והספים במשוואות – לשון אחר, השאלה מהו L_{crit} (מה נחשב מצב בלתי-קביל) ומהו ε (איזו הסתברות נחשבת נסבלת) – אינם תוצר של פורמליזם מתמטי גרידא; הם נקבעים בשילוב של נתונים, הנחות, ושיקול דעת מקצועי-נורמטיבי. תהליך הכולל מומחים טכניים, רגולטורים, גופי חירום, מפעילי תשתיות ונציגי ציבור, ולעיתים גם שיקולים ערכיים של שוויון, רציפות שירות, בטיחות והוגנות בחלוקת משאבים תחת מחסור.

עצם הדיון על "מה נסבל ומה לא" הוא חלק אינטגרלי מניהול סיכונים. הוא מכריח להגדיר יעדי חוסן, להבחין בין שירותים חיוניים לשירותים שניתן לצמצם זמנית, ולהסכים מראש על סדרי עדיפויות – כך שכאשר מתרחש אירוע, ההכרעות אינן מתקבלות באלתור ובחוסר עקביות אלא נשענות על ספי סיכון ו"תיאבון סיכון" שנקבעו מראש ובהלימה בין-מערכתית.

כך או אחרת, היתרון של שילוב מודל עניבת הפרפר עם מדדי זנב ומדדי ספים הוא בכך שהוא מחבר בין תרשים תפעולי לבין שפה ניהולית-כמותית.

מודל עניבת הפרפר מסייע לנו להגדיר באופן קונקרטי מהו אירוע-העל ומה מסלולי ההתדרדרות לחוסר תפקוד וכשל מערכתי: כיצד תקלה נקודתית הופכת לעלטה אזורית; כיצד עלטה גוררת פגיעה בתקשורת; כיצד פגיעה בתקשורת משבשת תדלוק ותחזוקה; וכיצד שרשרת זו מאריכה את זמן ההתאוששות עד כדי שבוע ולמעלה מכך.

בשלב הבא, מודל זנב מאפשר להגדיר עבור כל מסלול כזה החלטות ניהוליות: מה נחשב תוצאה בלתי-קבילה (סף), ומהי רמת הסיכון המותרת (סבילות). כך ניתן, למשל, להגדיר שסף בלתי-קביל במערכת הבריאות הוא מצב בו בתי חולים אינם מסוגלים לשמר שירותי חירום קריטיים מעבר ל-72 שעות; או שסף בלתי-קביל במערכת הפיננסית הוא אובדן נגישות מתמשך למנגנוני תשלום ומזומן שיוצר שיתוק מסחרי-קמעונאי. אין צורך בשלב זה לחשב מספרים; העיקר הוא להבין שהשיטה מאפשרת לגבש "מדיניות סיכון" ברורה: אילו תוצאות אנו לא מוכנים לקבל גם אם הן נדירות יחסית, ואילו מנגנונים ובלמים (טכניים, תפעוליים-לוגיסטיים, ארגוניים) מקטינים באופן היעיל ביותר את הסיכוי לחצות את הסף הזה.

חשוב להדגיש שהצגה של כלים מתקדמים לא מחליפה את מודל עניבת הפרפר, אלא משלימה אותו. מודל ה-bowtie מספק תיאור מבוסס עובדות ונתונים. הוא משמש מעין מפה ומסלולים (pathways): מה האיומים, היכן הבלמים, מה מסלולי ההשלכות, מה מנגנוני ההתאוששות. מדדי זנב וספי קטסטרופה מספקים מסגרת לדיון וכלים לקבלת החלטות: היכן להציב קווים אדומים, כיצד להגדיר סבילות סיכון, איך לתעדף השקעות, תרגול ונהלים כך שיפחיתו לא רק את ההסתברות לאירוע, אלא את הסיכוי להגיע לתוצאה בלתי-קבילה.

מטרתנו כאן היא להציג את ההיגיון והכלים, כדי שבשלב המשיך ניתן יהיה – בזהירות, עם נתונים ועם שותפים רלוונטיים – לתרגם אותם למדדי סף וסיכון יישומיים לכל סקטור ולממשקים שביניהם.

כאמור, ביקשנו להבחין בין צד האיזונים שמוביל לאירוע-העל (עלטה), לבין צד השלכות (consequences) שנובע ממנו, ואז להתמקד בהשלכות על- ובין- מגזרים, מערכות ותשתיות חיוניות.

הספרות והפרקטיקה בישראל ובעולם עוסקות בהרחבה רבה באיזונים – כשלים טכניים, עומסים, אירועי מזג אוויר קיצוני, אסונות גיאופיזיים, מתקפות סייבר ופגיעות קינטיות-פיזיות. לכן מטרתנו אינה להעמיק בהם מחדש, אלא להכיר בהם באופן תמציתי, ולהבהיר את נקודות המגע: כיצד איזונים שונים עלולים להוביל לאירוע-על של אובדן אספקת חשמל בהיקף ובמשך משמעותיים. לאחר זאת, מרכז הכובד עובר לצד "אחרי האירוע ובתוך האירוע".

בקטגוריית האיזונים הטכניים, הסיכון לעלטה נובע מכשלים בציוד ובמערכות הגנה, תקלות בתחנות משנה, כשלי בידוד, תקלות שרשרת ברשת ההולכה ותחנות המיתוג, וכן כשלי תפעול ותחזוקה שמגבירים את ההסתברות לאירועי "טריפינג" והתנתקות. כאן בולטת מרכזיותם של צווארי בקבוק – תחנות משנה מרכזיות ברשת ההולכה, תחנות מיתוג ותחנות השנאה אזוריות – הכול מתפקדות כנקודות ריכוז, ניתוב והורדת מתח בין רמות הרשת. בניגוד לפגיעה בכושר ייצור, שלעיתים ניתן לפצות עליה חלקית באמצעות מקורות אחרים או באמצעות ניהול ביקושים, פגיעה "במתקן צמתי" עלולה להותיר אזור ללא חלופה תפעולית זמינה בטווח הקצר, לא משום שאין חשמל "במערכת", אלא משום שאין דרך להעביר אותו בבטחה ובמסלולים חלופיים אל אזורי הביקוש. בהקשר זה עבודות קודמות הדגישו שפגיעה בתחנת מיתוג או בתחנת משנה מרכזית עשויה לייצר שיבוש עמוק עד כדי ניתוק אזורי רחב, ושיקומה יכול להימשך ימים עד שבוע, ולעיתים למעלה מכך.

בקטגוריית העומסים, הסיכון העיקרי הוא עלטה חלקית, מצומצמת (brownout) כתוצאה מקיצוב עומסים עם סיכון נלווה להתדרדר להחשכה נרחבת יותר כאשר מרווח התפעול נשחק – בייחוד בפרקי זמן שבהם הביקוש עולה בחדות, כגון ימי שרב, מהם נחוה עוד בעשורים הקרובים (כתוצאה משינוי אקלים אנתרופוגני). בשנים האחרונות נוסף ממד משנה את דינמיקת השיאים (שיאי ביקוש) ואת תפיסת היציבות²⁰: צרכנים גדולים וחדשניים בדמות חוות שרתים עם עומסי מחשוב כבדים (לרבות יישומי בינה מלאכותית עתירי אנרגיה), לצד חדירה גוברת של תחבורה חשמלית וטעינה מהירה. אלה אינם "עוד צרכנים", אלא ישויות בעלות פרופיל תפעולי שונה, למשל ריכוז גיאוגרפי, העמסה על רשתות חלוקה מקומיות וכיוצא בזה. מכאן, שהמענה אינו "הוספת קיבולת" גרידא, אלא ניהול מערכת וניהול גמישות, למשל באמצעות הסכמי Demand Response (הסדרים חוזיים ותפעוליים בהם צרכני חשמל גדולים מתחייבים להפחית, לדחות או להזיז צריכת חשמל כשמנהל המערכת מבקש, בתמורה לתשלום), תכנון וחיזוק רשת החלוקה, ניהול עומסים חכם, וכלים תעריפיים שמאפשרים להפחית ביקוש בזמן אמת ולהימנע מניתוקים לא-מתוכננים.

בקטגוריית אירועי מזג אוויר קיצוניים, פרופיל הסיכון בישראל קשור בעיקר לחום קיצוני, שריפות, רוחות ואבק, ולעיתים גם להצפות נקודתיות. אירועים אלה פועלים בכמה מישורים במקביל ולכן הם בעלי פוטנציאל הסלמה גבוה. הם עלולים להעלות ביקוש (למשל שיאי חום), ובו בזמן עלולים לפגוע ביכולת ההולכה והחלוקה ובהתאוששות, באמצעות נזק לקווים עיליים, פגיעה בתחנות משנה, ירידה ביעילות קירור ציוד, ופגיעה בנגישות צוותי תיקון לשטח. המשמעות היא "מכפילי סיכון": אירועים מטאורולוגיים והידרו-אקלימיים אשר, בעת ובעונה אחת, מגדילים את העומס על המערכת, למיצוי כושר הרחבה הקיימת ומקשים על תפעול המערכת, ולכן מגדילים את ההסתברות לשיבוש מתמשך ואת הסיכון לזליגת כשלים ומשברים.²¹

מעבר למזג אוויר קיצוני, יש להכיר גם במשפחת סיכונים גיאופיזיים. בראש ובראשונה רעידות אדמה, אך גם תרחישים נלווים כגון קריסות קרקע מקומיות, או מפולות, שמאופיינים בפרופיל כשל שונה: פגיעה פתאומית, מרובת-מוקדים, ולעיתים בלתי-ניתנת לתיקון במקטעי תשתית שונים²². אירוע גיאופיזי משמעותי עשוי לפגוע בו-זמנית בקווי הולכה עיליים ובתשתיות חלוקה, בתחנות משנה ובציוד מיתוג, ואף במבנים וביסוס של מתקנים, ובכך להשית מגבלה ממושכת על יכולת שיקום, הואיל והבעיה אינה רק תפעולית אלא הנדסית-פיזית. יתירה מזו, רעידת אדמה מהווה מכפיל סיכון מובהק. היא עלולה לפגוע במקביל גם בכבישים וגשרים, בתשתיות אספקת מים ובמערכות הטיפול בשפכים, ובתקשורת, וכך להקשות על תנועת צוותים, על הגעת חלפים וזלק, ועל ניהול רציפות תפקודית וכך, להאריך את חלון המשבר מעבר למה שמקובל באירוע הנדסי "טהור". לכן, גם אם הסתברות התרחיש אינה גבוהה ביחס לאיומים אחרים⁸, ההיגיון הניהולי זהה: יש לתרגם סיכון גיאופיזי לשאלות של רמות שירות מינימליות, סדרי עדיפויות שיקומיים, ותכנון יכולות שיקום בתנאים של תשתיות תומכות פגועות.^{25,24,23}

בקטגוריית איומי סייבר, הסכנה בשיבושי מערכות שליטה ובקרה הוא ייחודי משום שהוא פוגע בליבה הניהולית של המערכת: היכולת לנטר, לשלוט ולתאם בזמן אמת. פגיעה כזו אינה נשארת "מחשובית", היא עלולה להפוך במהירות לאירוע פיזי (קרי, "בעולם האמיתי"). מנהל המערכת מאבד תצפית, מתקשה לאבחן את מצב הרשת, מתקשה לנתב זרימות, מתקשה לבדוד תקלות או נאלץ לפעול בתנאי מידע חלקי²⁶. יתרה מכך, בעוד שתחנות הכוח נמצאות תחת רגולציה מחמירה בהקשרים אלו, מתקני ייצור מבוזרים חשופים לחולשות אבטחה, כגון ממירים סולאריים שאינם מכילים הגנות מספקות. עבודות קודמות עסקו באיום בהרחבה. בהקשר הישראלי, לצד השקעה במערכי סייבר ייעודיים והכשרות, נדרשת עמידות תפעולית, כלומר מוכנות לתפעול ידני תחת מגבלות, יכולת בידוד וסגמנטציה של רשתות, נהלי fallback כאשר תקשורת נפגעת, ושיקום מבוקר כאשר קיימת אפשרות לפגיעה מתמשכת או לחוסר אמון בנתונים.

בקטגוריית הסיכונים הפיזיים, פגיעה אנושית מכוונת בתשתיות עלולה להותיר מתקנים מסוימים בכל אחד המקטעים (ייצור, הולכה, אפסקה) וכן במערכות שליטה ובקרה (אצל מנהל הרשת) ניזוקים קשות. כאן, השאלה הראשונה היא לא "כמה נפגע", אלא "היכן נפגע" ומה המשמעות הטופולוגית של הפגיעה על זרימת ההספק ועל כושר העקיפה. צווארי בקבוק ברשת ההולכה, המיתוג וההשנאה הם נקודות רגישות במיוחד. זו הנקודה שבה ארכיטקטורת הרשת משפיעה על סיכון מערכתי – ולכן היא (הארכיטקטורה) חייבת להיות חלק מהערכת הסיכונים, הסבירות, ההשלכות, וזמני ההתאוששות.

אחרי כל זה, אנו סוגרים את הדיון בצד האיומים במודל עניבת הפרפר. אנו מכירים בקיומם של סיכונים מגוונים, אך איננו דנים כאן בהרחבה בכל טריגר וטריגר. אנו עוברים אל צד השלכות – לבחון כיצד אירוע-העל מתרגם לפגיעה סקטוראלית; כיצד הפגיעה מתהווה והולכת לאורך חלונות זמן של 168-24 שעות; היכן נוצרים "מכפילי סיכון" וזליגות; ומהם המנגנונים התפעוליים והלוגיסטיים שבכוחם לבלום התדרדרות ולהאיץ התאוששות.

⁸ לפי המכון למחקרי ביטחון לאומי (INSS), ההסתברות להתרחשות האירוע (רעידת אדמה הרסנית) עומדת על כ-5% על פני תקופה של 50 שנים. הסתברות זו אומצה על ידי הממשלה. אם הסיכון יתממש, המכון קובע כי יש להיערך לכ-7,000 איש, פציעות בדרגה בינונית וקשה של למעלה מ-8,000 איש, ופציעות בדרגה קלה של כ-37,000 איש, כמו גם הרס של כ-28,600 מבנים וכ-170,000 עקורים.

חלק שני: השלכות עלתה על תשתיות ומערכות חיוניות לאורך זמן

פרק 5: עלתה בתשתיות ומערכות תקשורת

כשל באספקת חשמל לתשתיות תקשורת מהווה "מכפיל סיכון" מובהק. תשתיות ומערכות תקשורת אינן מספקות רק שירות לציבור (תקשורת סלולרית, רדיו, טלוויזיה וכיוצ"ב) אלא גם שכבת שליטה, בקרה ותיאום לכל מערכת קריטית אחרת. בפועל, רבות מן המערכות התפעוליות – בחשמל, במים, במזון, בתחבורה, בבריאות ובפיננסים – מניחות זמינות תקשורת נתונים רציפה, או לכל הפחות ערוצי קשר אמינים לצורך הפעלה, דיווח ותיאום.

בעת הפסקת חשמל, רשתות סלולר, מרכזיות תקשורת, אתרי שידור, ומרכיבי קצה נשענים על שכבות גיבוי כמו UPS (Uninterruptible Power Supply, מכשירי גיבוי חשמלי קצרי-טווח), סוללות וגנרטורים. לכן, בשעות הראשונות התקשורת לרוב אינה "נעלמת" בבת אחת; במקום זאת חלה דגדגה הדרגתית, אך מצטברת: הכיסוי והקיבולת נשחקים מחד, עומסי שיחה ודאטה מזנקים עקב שינוי בדפוסי שימוש מאידך (חיפוש מידע של הציבור ופעילות מוגברת של גופי חירום), וברקע חלק מן האתרים עוברים למצב הגנה או כשל.

מנקודת מבט של ניהול סיכונים, הדגש איננו רק על "האם יש קליטה", אלא על רמת השירות בפועל: זמינות רציפה, קיבולת (כמה תעבורה, או שימוש, הרשת יכולה לשאת בו-זמנית לפני שהשירות נעשה איטי, מקוטע או קורס), אמינות העברת נתונים, וזמן התאוששות לאחר נפילה.²⁷

נכון להיום, אתרי הקצה ברשתות הסלולר מחויבים – במסגרת דרישות רגולטוריות של משרד התקשורת – להחזיק גיבוי אנרגטי מינימלי של כשעתיים להפעלת האתר גם כאשר אספקת החשמל מהרשת הארצית נפסקת. עם זאת, מנקודת מבט של חוסן תפקודי "שעתיים גיבוי" הן חלון קצר. הן עשויות להספיק לאירוע נקודתי ולמעבר מסודר לגנרטור או עד שיקום מהיר, אך אינן מתיישבות עם תרחישי עלתה אזוריים מתמשכים שבהם נגישות לתדלוק ולתחזוקה מוגבלת, ושכבת התקשורת עצמה נדרשת לנהל את המשבר. בהתאם לכך, משרד התקשורת מוביל בשנים האחרונות מהלך של "עיבוי אנרגטי" לאתרי סלולר קריטיים⁹, שמטרתו להאריך את זמן העצמאות האנרגטית של האתרים משעתיים ל-12 שעות ואף יותר, באמצעות גנרטורים ומערכי מצברים מתקדמים.²⁸

יש לציין כי זיהוי אתר הקצה כחוליה רגישה אינו מתורגם בהכרח לפתרון רגולטורי פשוט. בישראל פועלים אלפי אתרי קצה סלולריים הפרוסים גיאוגרפית, ולכן חיוב אחיד של כלל האתרים בגיבוי אנרגטי ממושך כרוך בעלויות גבוהות, מגבלות פיזיות והנדסיות ואתגרי יישום. לפיכך, המדיניות בפועל נשענת על שילוב בין חובת בסיס רחבית, חיזוק ממוקד של אתרים קריטיים ותיעדוף נקודתי בחירום.

עם זאת, חשוב להדגיש כי עצם קיומו של גיבוי אנרגטי באתרי הקצה אינו מבטיח בהכרח זמינות שירות: רשתות סלולר נשענות גם על תשתיות תמסורת (backhaul) המחברות את האתרים לליבת הרשת, ותשתיות אלה עשויות להיפגע באופן בלתי תלוי באספקת החשמל המקומית. בתרחישים שבהם העלתה נגרמת או מלווה באירועי קיצון נוספים, ייתכן כי פגיעה בתמסורת תגביל את יכולת התקשורת גם כאשר אתרי השידור עצמם ממשיכים לפעול על גיבוי.

על כן, בחלון של עד 24 שעות, הציפייה היא לחוות שחיקה ניכרת בעיקר במקומות בהם לא ניתן להגיע פיזית לאתרים לצורך תדלוק, תיקון או החלפת רכיבים, ובאזורים בהם נפגעה תשתית התמסורת (backhaul) – בין אם

⁹ המהלך בוצע תחילה באזורים שנחשבו פגיעים יחסית במצבי חירום (כגון הצפון, ועוטף עזה), בהיקפים של כ-650 אתרי קצה שעברו עיבוי אנרגטי, לפי דיווחים בתקשורת. בהמשך, המאמץ הוסט גם למטרופולין תל-אביב וגוש דן, בין היתר לאור צפיפות אוכלוסין גבוהה ותלות גבוהה של שירותים חיוניים בקישוריות סלולרית רציפה.

מדובר בקווים אופטיים, קישורי מיקרוגל או רכיבי תמסורת אחרים¹⁰. גם אם ניתן עדיין לבצע שיחות בחלק מן האזורים, הפגיעה המשמעותית נוטה להופיע ביכולת העברת הנתונים ובאמינותם, ובייחוד ביכולת לתחזק ערוצי מידע רציפים בין גורמי חירום ומקבלי החלטות.

במקביל, כבר בחלון הזה נוצרת דינמיקה של "עומס-יתר": הציבור מחפש מידע והנחיות, מתרחש זינוק בבדיקת עדכונים ובהתקשרויות, והעומס עצמו הופך למאיץ של הירידה באיכות השירות.

ברשתות תקשורת קיימים גם מנגנוני ניהול עומסים ותיעדוף (traffic management), כגון מתן קדימות לשירותים קריטיים או לקבוצות משתמשים חיוניות. אלו עשויים למתן חלק מן ההשפעה ולשפר את ניצול המשאבים בתנאי שיבוש. כמובן, יעילותם של מנגנונים אלה תלויה ביכולת לממשם בפועל תחת מגבלות קישוריות ותפעול, ובמידת העקביות של המדיניות בין רשתות ומפעילים.

בפרק של 48 שעות, התלות בלוגיטיקה הופכת לגורם מכריע. אם מדובר בעלטה אזורית מוגבלת, ניתן לעיתים לייצב את הרשת באמצעות תדלוק ממוקד, תיעדוף אתרים קריטיים ותיקונים נקודתיים במקטעי תמסורת שנפגעו. אולם ככל שהעלטה רחבה יותר, הלוגיטיקה עצמה נשחקת. בין היתר, תנועה משובשת עקב רמזורים כבויים ומנהור מוגבל, תחנות דלק אינן מתפקדות במלואן, וקצב הספקת הדלק, החלפים והצוותים אינו מספיק כדי לשמר את כל האתרים. בשלב זה מבליחות גם מגבלות תפעוליות שמחריפות את השחיקה הלוגיסטית בזליגה בין-סקטוריאלי: שיבושים במערכות תשלומים המבוססות על תקשורת עלולים להקשות על רכישת דלק, ובמקביל ירידה בזמינות אמצעי תחבורה עלולה להאט עוד יותר את התנועה ואת קצב התדלוק והתחזוקה. התוצאה היא מעגל היזון חוזר שבו ירידת התקשורת פוגעת בלוגיטיקה, והלוגיטיקה הפגועה מקטינה עוד יותר את יכולת שימור התקשורת.

בנוסף, כאשר שיבושי החשמל והתמסורת מתרחבים, גם רציפותם של חלק מערוצי השידור המסורתיים עלולה להיפגע, דווקא בעת שהציבור צמא למידע, מה שמחזק את הצורך בתכנון מראש של ערוצי הפצת מידע חלופיים.

מערכות רמזורים שאינן פועלות יוצרות עומסי תנועה ושיבושים בצירי גישה, ורשתות תקשורת סלולריות וטלפוניות שאינן זמינות מקשות על הזנקת צוותי הצלה ועל ניהול אירועים מרובי זירות. במקביל, לציבור הרחב עלולה להיחסם האפשרות לפנות למוקדי החירום, משטרה, מד"א וכבאות, ולקבל הנחיות בזמן אמת. מצב זה מייצר "חלל מידע" שבו אין מקור עדכונים אמין ורציף, ומכאן גם פוטנציאל לעלייה באי-ודאות ובתחושת אובדן שליטה.

בנקודה זו מתחיל להיווצר פער בין "שרידות הנדסית" לבין "יכולת תפעולית": גם כאשר יש גנרטורים, הם אינם פתרון ללא תכנית תדלוק, תחזוקה, ומנגנון תיעדוף שקובע אילו אתרים נשמרים על חשבון אתרים אחרים.

בחלון של 72 שעות ומעלה, עולה משמעותית הסיכון לקריסה תפקודית של שירותי סלולר ותקשורת נתונים באזורים נרחבים, במיוחד אם מתקיימים במקביל שיבושים בתקשורת קווית/אופטית או אירוע סייבר נלווה שמקשה על תפעול מוקדים וניהול תצורה מרחוק. מאותו שלב ואילך מערכת התקשורת הלאומית נוטה להתפזר ל"איים של תפקוד": אתרי ליבה וצמתי רשת מרכזיים עשויים להפגין שרידות טובה יותר, בעוד שבמרחבים אחרים ובפריפריה השירות נשחק, נעשה מקוטע, ולעיתים נעלם לפרקי זמן ארוכים. במצב כזה המשק נדרש להישען יותר על

¹⁰ קישוריות Backhaul היא שכבת התמסורת שמחברת את אתרי הקצה בשטח, בעיקר אנטנות/תחנות בסיס סלולריות, אל ליבת רשת המפעיל, המרכזיות ונקודות החיבור לאינטרנט. בפועל, ה-backhaul יכול להתבסס על סיב אופטי, קישור מיקרוגל (רדיו-קישור) או תמסורת ייעודית אחרת. מאפייני הפגיעות משתנים לפי סוג התמסורת והאיום: קישורי מיקרוגל עשויים להיות רגישים יותר לאירועי מזג אוויר קיצוני, בעוד שקווים אופטיים עשויים להיות עמידים יותר בהקשר זה, אך חשופים לפגיעות פיזיות אחרות, כגון רעידות אדמה. כאשר קישור ה-backhaul נפגע, ייתכן שאתר השידור עצמו עדיין מוזן חשמלית וממשיך לפעול מקומית, אך ללא "נתיב הובלה" אל ליבת הרשת אין לו יכולת להעביר שיחות ונתונים הלאה. כתוצאה מכך השירות באזור מתדרדר, נעשה מוגבל מאוד, או קורס לחלוטין.

תקשורת ייעודית לגופי חירום, על קשר רדיו, ועל פתרונות לווייניים – אך אלה מוגבלים בקיבולת, בזמינות ציוד, ובשאלה מי מוסמך להפעילם ובאילו תנאים. לכן החסם המרכזי איננו טכנולוגי בלבד; הוא גם ארגוני ורגולטורי. כאן עלינו לשאול מהן התשתיות החלופיות הקיימות, כיצד מופעלות סמכויות בעת חירום, וכיצד מתבצע תיעודף משאבים כשהשירות הציבורי והצורך התפעולי מתחרים על אותה קיבולת מצטמצמת.

כאמור לעיל, בנקודת 72 שעות מתחדדת תופעה אופיינית למשבר רב-מערכתי: השאלה אינה עוד "האם קיימת רשת", אלא "איזו תקשורת נשמרת למי, ובאיזו רמת שירות". גם כאשר חלק מן האתרים ממשיכים לשדר, קיבולת הרשת נשחקת, נוצרות "בועות כיסוי" מקוטעות, והקצאת המשאבים נוטה להתרכז – לעיתים בפועל גם אם לא בהכרח – באתרי ליבה, בצמתי רשת עירוניים, במוקדי חירום ובאזורים שבהם קיימת נגישות לוגיסטית לתדלוק ולתחזוקה. במקביל, המתח בין שימוש ציבורי לשימוש תפעולי מתחדד. עומסי ציבור (שיחות, הודעות, צריכת מידע) עלולים להקטין את יכולת התיעודף של תעבורה קריטית, ולכן נדרשים מנגנוני ניהול עומסים, עדיפויות לתעבורה חיונית, סגמנטציה, והישענות על ערוצי חירום ייעודיים שאינם מתחרים באופן מלא עם התעבורה האזרחית.

בנקודת 96 שעות, אם העלטה נמשכת, ניתן לצפות לכשלים עקיפים שמאיצים את שחיקת התקשורת בדינמיקה של "ספירלה הרסנית" (או מעגל קסמים שלילי): תחזוקה שוטפת של אתרים נפגעת, מלאי דלק, שמנים ומסננים לגנרטורים נשחק, וסוללות הנדרשות למחזורי פריקה-טעינה תכופים מאבדות יעילות. בשלב זה גם "שחיקת צוותים" הופכת גורם סיכון בפני עצמו: היקף הטכנאים הזמינים, היכולת להגיע לאתרים בבטחה, והיכולת לקבל החלטות בזמן אמת תחת עומס מידע חלקי. במקביל מתדרדרת קישוריות בין-ארגונית: ספקי תקשורת, מוקדי חירום, רשויות מקומיות ומשרדי ממשלה מתקשים לתאם באמצעות מערכות דיגיטליות, והאינטגרציה בין מערכות ניהול אירועים, מערכות מיפוי תקלות, ומערכות הקצאת משימות, נעשית חלקית או בלתי יציבה, בדיוק בשלב שבו הצורך בתיאום אמור להיות בשיאו. לשון אחר, היעדר תקשורת מוביל להיעדר תקשורת וחוזר חלילה.

בנקודת 120 שעות (חמש יממות), התלות בין מערכות תקשורת לשאר הסקטורים מחריפה ונעשית דו-כיוונית. מצד אחד, תקשורת חלקית ומקרטעת מקשה על תיאום שיקום החשמל, המים והתחבורה; מצד שני, שיבושי תחבורה ותדלוק מקשים לשמר את רמות השירות המצומצמות שנותרו. בשלב זה מפעילי רשתות עשויים לעבור לאסטרטגיית "שירות מינימלי": צמצום יזום של כיסוי באזורים בלתי-חיוניים (יש כמובן להגדירם, ויפה לעשות זאת מבעוד מועד) כדי לשמר קיבולת ותפעול באזורים קריטיים, לצד התאמת סוגי שירות כך שיעדיפו ערוצים חסכוניים יותר ברוחב פס כאשר הדבר אפשרי. חשוב להדגיש שגם "חזרת חשמל חלקית" אינה פותרת בהכרח את הבעיה, או למצער אינה פותרת את הבעיה מיד. ציוד שנפל אינו חוזר תמיד באופן אוטומטי, לעיתים נדרש אתחול ידני, או שיקום קישורים, ולכן קיים פער בין חזרת אספקת חשמל לבין חזרת שירות תקשורת יציב.

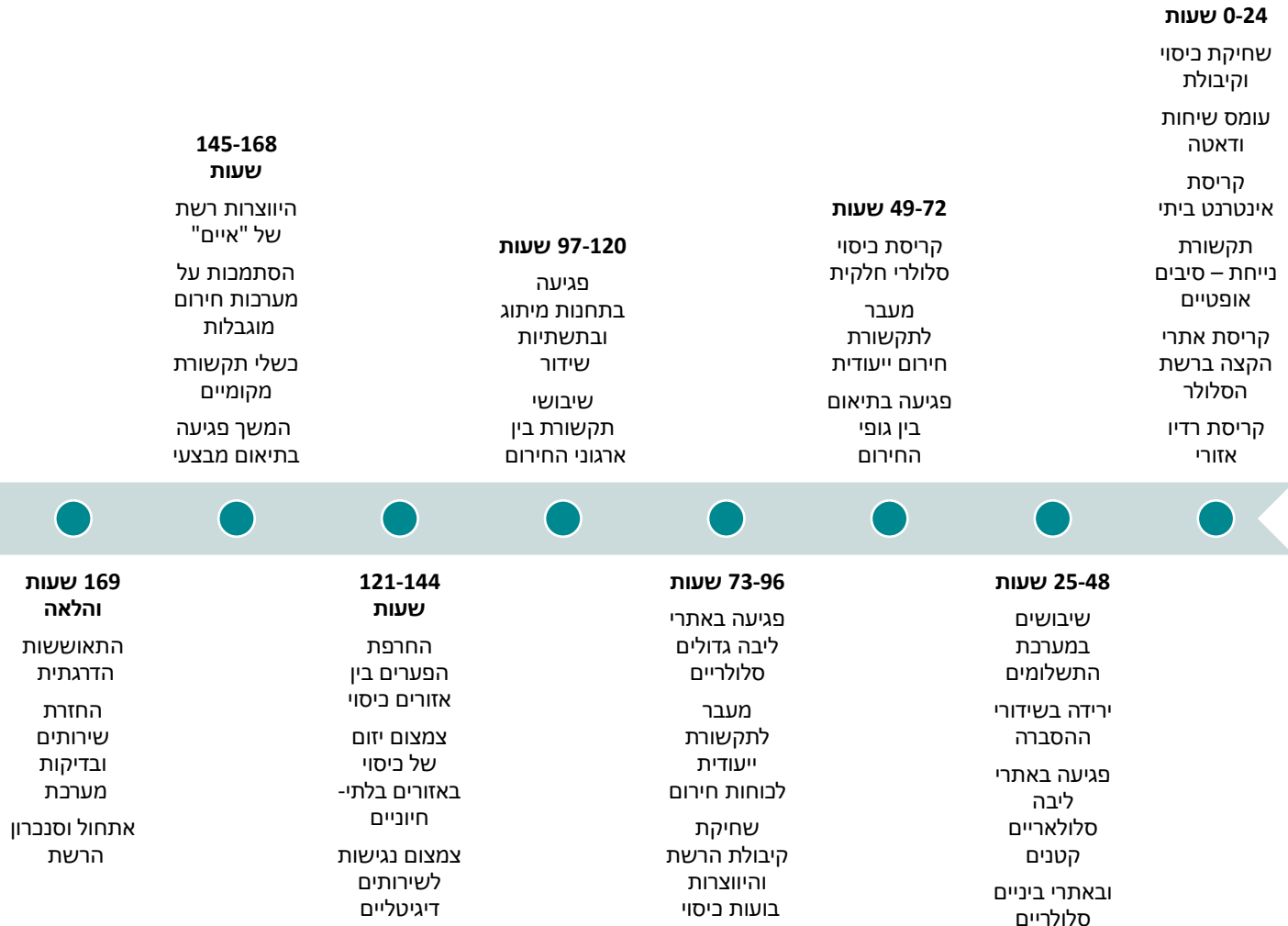
בפרק זמן של 144 שעות, מתחדד ומחריף הממד החברתי של היעדר תקשורת. כאשר אין תקשורת רציפה, היכולת להפיץ הנחיות לציבור (מעבר לשירותי רדיו חירום), להפעיל שירותים דיגיטליים שונים, ולשמר אמון סביב "מה מתרחש והיכן" נפגעת. הפער בין מידע רשמי למידע שמופץ בערוצים בלתי רשמיים גדל, ולעיתים נוצר רעש מידע שמקשה על התנהגות ציבורית מושכלת ורציונאלית. בהיעדר מסר אחיד ומתוזמן, מידע חלקי או שגוי עלול להתפשט ולהשפיע על התנהגות הציבור, על דפוסי תנועה ועל עומס הפניות לגורמי ההצלה. מכאן עולה החשיבות של יכולת תקשורת חירום אמינה גם אם מצומצמת, ושל תכנון מראש לערוצי "דיבור" שאינם נשענים על אותה תשתית: תחנות רדיו חירום, שילוט עירוני, מוקדים פיזיים, ורשתות ייעודיות שנועדו לפעול גם כאשר האינטרנט הציבורי מוגבל. תכנון כזה קריטי לצמצום אי-ודאות, לחיזוק אמון הציבור במידע הרשמי ולתמוך בתפקוד יעיל יותר של מערכות החירום בזמן משבר.

בנקודת 168 שעות (שבוע ימים), התקשורת הופכת במידה רבה לתשתית המחייבת שיקום בפני עצמה. כאשר החשמל חוזר בהדרגה, שיקום רשתות תקשורת דורש סבבי תיקון, בדיקות יציבות והחזרת רמות שירות בתיעדוף. אם קיימת פגיעה פיזית בסיבים או בצמתי ליבה, שבוע של עלטה עלול להשאיר "צלקות תפעוליות" משום שהרשת חוזרת לאט, ובאופן לא אחיד. בתרחיש כזה ההבדל בין פגיעה ממושכת לבין התאוששות מהירה נקבע ביתירות – פיזית ותפעולית – וביכולת לתדלק ולתחזק תחת מגבלות תנועה, מידע חלקי ועומס.

בנוסף, חשוב לציין כי דינמיקת העומסים ברשת התקשורת אינה נקבעת רק על ידי מצב התשתית והיתירות, אלא גם מושפעת מגורמים התנהגותיים ומתזמון האירוע. דפוסי שימוש של הציבור ושל גופי חירום, "התנפלות" על ערוצי מידע, וכן עיתוי ביחס לשעות שיא תעבורתיות (האם האירוע פרץ במהלך השבת, או במהלך יום חול). גורמים אלה יכולים להאיץ או למתן את הלחץ על המערכת בשלבים שונים של המשבר, ולכן הם מרכיב נוסף שיש להביא בחשבון בהערכת רמת השירות וזמני ההתאוששות.

במונחי מודל עניבת הפרפר לסקטור התקשורת, משפחת האיומים המרכזית כוללת הפסקת חשמל מתמשכת, מחסור בדלק לגיבוי, מגבלות גישה לאתרים, פגיעה בשירותי התמסורת (backhaul) ומתקפות סייבר על רכיבי תפעול. אירוע-העל הסקטוריאלי הוא ירידה לרמת שירות שאינה מאפשרת רציפות תקשורת ציבורית ותקשורת נתונים בהיקף רחב לאורך זמן. ההשלכות אינן מסתכמות באי-נוחות ציבורית; הן כוללות פגיעה ביכולת ניהול אירוע, פגיעה בתשלומים ובשירותים פיננסיים, פגיעה בשירות הרפואי, ופגיעה ביכולת להנחות את הציבור באופן אמין. המנגנונים החיוניים לשכך את המשבר ולהאיץ התאוששות הם גיבוי אנרגטי רב-שכבתי, תיעדוף אתרי ליבה ושירותים קריטיים, תכנית תדלוק ותחזוקה בת-ביצוע גם בתנאי שיבושי תחבורה, ותשתית תקשורת חירום ייעודית המסוגלת לספק, לכל הפחות, שכבת קשר מינימלית לגופי חירום ולמוקדי שליטה גם כאשר האינטרנט הציבורי נפגע²⁹.

תרשים 4: השלכות עלטה רחבת היקף על תשתיות ומערכות תקשורת



פרק 6: עלטה בתשתיות ומערכות מים

מערכות אספקת מים, טיפול במים וטיהור מי שפכים הן מן התשתיות התלויות ביותר בחשמל, לא רק ברמת הנעת משאבות אלא גם ברמת שליטה ובקרה תברואתית: תחנות שאיבה, מתקני התפלה, מערכות לחץ, מערכות בקרה, חיטוי וניטור איכות נשענים על אנרגיה ועל תקשורת תפעולית רציפה. בשל חשיבות אספקת מים רציפה, ותלות של מערכות מים בחשמל, משק המים בישראל תוכנן תוך התחשבות בשיקולי חוסן לרבות ביזור מקורות, ריבוי מקורות הזנת מים ברמה המקומית והארצית, איגום, גיבוי מקומי ויכולת ניהול רמות שירות.

בישראל, מתקני התפלה מהווים רכיב מרכזי באספקת מי השתייה והשימוש הביתי וחלק ניכר מן המים מסופק באמצעותם (כ-70%), תוך צריכת אנרגיה סגולית של סדר גודל 3.5-4 קוט"ש למ"ק מים מותפלים. במקביל, משק המים בכללותו צורך סדר גודל של כ-6% מצריכת החשמל במשק³⁰.

מתקני ההתפלה משולבים עם מקורות מים נוספים במערכת הארצית, ולכן פגיעה ביכולת ההתפלה אינה מתורגמת באופן מוכני ומיידי למחסור מוחלט במים, אלא לתלות גוברת בניהול מקורות חלופיים ובניתוב בזמן אמת – אך למרבה הקושי, בדיוק בנסיבות בהן יכולת התיאום, האנרגיה והלוגיסטיקה נשחקות. בעת עלטה, מתקני התפלה צפויים לעבור לתלות במערכי גיבוי אנרגטיים – גנרטורים ומערכי אל-פסק¹¹ – בהתאם למאפייני התפעול וההיערכות¹². באותה נשימה, יש להדגיש כי מנגנונים אלו אינם מהווים גיבוי מלא, ומתקני התפלה נדרשים לפתרונות ייעודיים, תלויי תחנות כוח.¹³

כאן מתברר שההבחנה הקריטית אינה בין "יש מים" לבין "אין מים", אלא בין אספקה מלאה לשגרה לבין אספקה חלקית או מינימלית לצרכים מועדפים; ובין אספקה זמינה לבין אספקה תקינה ובטוחה¹⁴. איכות המים עלולה להיפגע אם מערכות ניטור, חיטוי ובקרה אינן זמינות או אינן מתפקדות במלואן, והמשק נכנס למרחב החלטות שבו תיעדוף, שקיפות לציבור וניהול סיכונים תברואתי חשובים לא פחות מן השאלה ההידראולית-אנרגטית³¹.

כאמור, משק המים בישראל כולל יכולות גיבוי מובנות. במרבית תאגידי המים, תחנות שאיבה ומתקני השפכים קיימים גיבויי גנרציה ומלאי סולר המאפשרים עד כ-10 ימי עבודה בעת שיבושים ברשת החשמל. עם זאת, בתרחיש עלטה רחב ומתמשך, יכולת זו נשחקת בהדרגה בשל תלות בתדלוק, תחזוקה וגישה לאתרים, ובשל פגיעה אפשרית בתקשורת התפעולית. כתוצאה מכך, גם כאשר "יש אספקה", רמת השירות ואיכות המים עשויות להידרדר באופן מצטבר לאורך ימים.

ב-24 השעות הראשונות, ברבים מן האזורים בישראל צפויה המשכיות יחסית הודות לאיגום ולגיבוי. ההשפעות נטות להופיע במרחב באופן בלתי-אחיד, בעיקר באזורים גבוהים ואזורים ומתחמים הנשענים על שאיבה אינטנסיבית. אלו עלולים לחוות ירידות לחץ, הפרעות אספקה או הפסקות מקומיות מוקדמות יותר, משום שמאגרי

¹¹ ממצאי ביקורת המדינה מציינים כי פגיעה בפעילות מתקני התפלה או בהזרמת מים אליהם עלולה להביא לקושי באספקת מים באזורים מסוימים, ומדגישים את התלות של משק המים באספקת חשמל רציפה. דוחות מבקר המדינה מוסיפים כי גם בשגרה, אירועי השלת עומסים אינם מתועדים תמיד או מדווחים בזמן אמת לכלל הגורמים המפעילים. לדוגמה, באירוע השלת עומס ביוני 2023, בעת ביקוש שיא לחשמל, ובמשך כשבע שעות הופסקה פעולתם של ארבעה מתקני התפלה ללא תיאום עם רשות המים.

¹² לצד זאת, בשנים האחרונות נבחנות אפשרויות לשילוב מקורות אנרגיה מתחדשים, בעיקר סולאריים, כחלק מהגברת אמינות התפעול במתקני מים.

¹³ חוסנם של מתקני התפלה אינה סוגיה הנדסית גרידא. בעת חירום, החלטות על תיעדוף צרכים וצרכנים במשק האנרגיה – האם חשמל יופנה למתקני התפלה או לרשת החשמל הארצית לצרכים אחרים – תשפיע על כושר ההתפלה. במילים אחרות, רציפות אספקת מים תלויה במשילות ותיאום בין רגולטורים.

¹⁴ יש להדגיש: גם כאשר ניתן לשמר זרימה חלקית, בפועל אספקת המים אינה אחידה בין שימושים שונים, והיא נשענת על רמות גיבוי שונות; אספקת מים לשתיה ולשימושים ביתיים חיוניים נוטה להיות מגובה ובטוחה יותר, בוודאי בטווחי זמן מיידיים, בעוד שאספקה לשימושים אחרים כגון חקלאות ותעשייה מצטמצמת מוקדם יותר, ובמקביל מתעוררים אילוצים בתפקוד מערכות סילוק השפכים והשימוש בקולחין.

הגובה וקיבולת הגיבוי אינם מחפים תמיד על איבוד השאיבה הרציפה. בערים, בבניינים רבי קומות, אספקת מים לשתייה, רחצה וסניטציה מעל הקומה הרביעית תלויה במשאבות חשמליות. במקרים בהם קיים היעדר גנרטורים, דיירי הקומות העליונות עלולים לחוות ירידה בלחץ המים, עד כדי הפסקת אספקה.

במקביל, מתקני התפלה ותחנות שאיבה גדולות עשויות להמשיך לפעול בהיקף חלקי³², בכפוף לכשירות הגיבוי ולמלאי הדלק הזמין, וכמובן, בכפוף לשקלול תמורות בין סקטוריאלי אשר כרוך מטבעו בבחירות לא נוחות – מים על חשבון תקשורת, מים על חשבון תחבורה, מים על חשבון תוצרת חקלאית בקירור.

לשון אחר, כבר בחלון זה נדרשת מסגרת תיעודי: האם להפנות דלק וחשמל לגיבוי של אספקת מים לשתייה על חשבון שימושים אחרים, כיצד מגדירים "צרכן חיוני" ומהי רמת השירות המינימלית שכל רשות יכולה להתחייב לה תחת מגבלות אנרגיה וגישה. בשלב זה, ההבדל בין תכנון שגרתי לבין תכנון חירום מתבטא ביכולת לקבל החלטות מהירות על חלוקת משאבים בין מקורות, מאגרים, תחנות שאיבה ונקודות ביקוש.

אלו סוגיות שיפה להן דיון מוקדם, טרם התממשות הסיכון.

ב-48 שעות, המצוקה התפעולית נעשית מוחשית יותר, בעיקר כאשר נפגעת התקשורת או כאשר צוותים מתקשים להגיע לאתרים. יתירה מזו, הצורך בתפעול ידני ובבקרה שטחית עולה; שמירת רמות כלור, בקרה על לחצים, ניטור עכירות ואיתור חריגות – אלו נשענות על מערכות בקרה וחיישנים, אך כאשר אלה מוגבלים, "האדם שבמכונה" יקבע את רמת השירות והאמינות.

באותה נשימה, יש להכיר בכך שיכולת הבקרה האנושית אינה שקולה לבקרה מכאנית רציפה. במערכת השפכים, הפסקת שאיבה יכולה לייצר הצטברות וגלישה בנקודות תורפה, עם סיכון סביבתי ובריאותי. כאן מתחילה להיחשף המשמעות המערכתית: כשל במערכות מים וטיהור שפכים אינו נשאר בגבולות הסקטור, אלא הופך במהירות לגורם שעלול לפגוע בתפקוד מוסדות הבריאות ובבריאות הציבור, לאתגר ייצור מזון, ולהעצים לחצים על הרשויות ועל הסדר הציבורי.

לשם דוגמה, ירידה מתמשכת בלחץ מים אינה משפיעה רק על צריכה ביתית, אלא על יכולות תפקוד קריטיות. לחץ נמוך עלול להגביל את הפעלת מערכות כיבוי אש בקיבולת הנדרשת ולהאריך זמני תגובה באירועים מרובי מוקדים. מתקני בריאות הנשענים על לחץ מים יציב לצורכי תברואה, סטריליזציה והפעלת ציוד עשויים להיתקל בקושי תפעולי, עד כדי צמצום שירותים שאינם חיוניים. בנוסף, תנודות בלחץ ברשת אינן מתבטאות רק בהאצת בלאי. במערכות ישנות או פגיעות הן עלולות להוביל לכשלים נקודתיים מסדר שני – נזילות, פריצות או פגיעה באטימות – וליצור תנאים שבהם איכות המים נעשית חשופה יותר לחדירת מזהמים בנקודות תורפה. במקביל, במערכות השפכים התלות בשאיבה רציפה הופכת את הפגיעה לרגישה במיוחד. כאשר השאיבה נפסקת או נעשית מקוטעת, עולה הסיכון להצטברות ולגלישה מקומית, עם השלכות סביבתיות ותברואתיות מיידיות.

החל ב-72 שעות ומעלה, תשתיות המים נשענות כמעט לחלוטין על מערכות גיבוי. אם לא קיימת אספקת אנרגיה עקבית ותדלוק סדור, הסיכון למחסור מקומי במים לצרכים חיוניים עולה, ובפרט לצרכי סניטציה ותברואה, ובמקביל סיכונים זהים משפכים הופכים לבעיה ניהולית מרכזית. קיימים פתרונות מוכרים – גיבוי אנרגטי, נוהלי תיעודי, מאגרי חירום ותוכניות חלוקת מים – אך בשלב זה מתחדדים גם החסמים: עלויות החזקה ושגרה של מערכי גיבוי, ריבוי בעלויות ותיאום בין גופים שונים, והיעדר סטנדרט אחיד וברור של "כמה שעות גיבוי" נדרשות בכל מתקן ולכל רכיב תפעולי. מכאן ואילך, הכשירות המערכתית נקבעת פחות על ידי "יש לנו גנרטור", ויותר על ידי שרשרת שלמה של תפעול: דלק, תחזוקה, צוותים, כימיקלים לטיפול, ויכולת תיאום כאשר התקשורת מוגבלת, וגם התחבורה מוגבלת.

ככל שחולף הזמן, מתבלטת תת-סוגיה אופיינית למערכות ותשתיות מים: ההפרדה בין זמינות לבין איכות. גם אם ניתן להמשיך להזרים מים בהיקף חלקי, קשה לשמר שגרת חיטוי, ניטור ובקרה על שינויים כימיים כאשר מערכות הבקרה, התקשורת והדיגום נפגעות. לכן בשלב זה נדרשות החלטות שמאזנות בין רציפות אספקה לבין שמירה על סטנדרטים תברואתיים – כולל הנחיות לציבור על שימוש מושכל, אפשרות להנחיות רתיחה (ככל שמשקי בית ערוכים לכך) או הגבלות שימוש, ותיעדוף אספקה למתקנים חיוניים. בשלב זה, ייתכן מעבר להגבלת צריכה או לקיצוב אספקה באזורים מסוימים, ואף פתיחת נקודות חלוקת מים אם לא ניתן להבטיח אספקה רציפה.

ירידה מתמשכת בלחץ במערכת אספקת המים יוצרת רצף של השפעות מערכתיות החורגות מעבר לפגיעה בצריכה הביתית. עבור שירותי הכבאות וההצלה, לחץ מים נמוך עלול להגביל את היכולת להפעיל מערכות כיבוי בקיבולת הנדרשת ולהאריך את זמני התגובה באירועים מרובי מוקדים. במקביל, מתקני בריאות כגון בתי חולים, מרפאות ומכונים תלויים בלחץ מים יציב לצרכי תברואה, סטריליזציה והפעלת ציוד; כאשר תנאים אלו אינם מתקיימים, עשויה להידרש הפחתת פעילות ואף סגירה זמנית של חלק מהשירותים, מה שיביא לדחיית טיפול רפואי על כל המשתמע. בנוסף, שינויים בלחץ ברשת עלולים לאפשר חדירה של מזהמים למערכת האספקה, במיוחד בנקודות שבהן התשתית ישנה או פגיעה, ולהוביל לחשש מפגיעה באיכות מי השתייה.

במצבים כאלה הרשויות נדרשות לעיתים לפרסם הנחיות זהירות לציבור, כגון המלצה להרתיח מים לפני שימוש. אולם להנחיות מסוג זה עשויה להיות גם השפעה התנהגותית: משקי בית ועסקים נוטים לאגור מים מחשש למחסור או לזיהום, והגידול המהיר בצריכה ובאגירה עלול להעמיק את ירידת הלחץ ברשת ולהחמיר את חוסר היציבות התפעולית. כך נוצר מעגל משוב שבו עצם התגובה הציבורית, גם אם מובנת והגיונית, מגבירה את העומס על המערכת. בשל כך, בתכנון היערכות לחירום מודגשת חשיבותם של מסרים מדורגים וברורים לציבור, ניהול ביקושים בזמן אמת והקצאה מבוקרת של מים לאתרים קריטיים, לצד חיזוק יתירות האספקה והיכולת לשמר לחץ מינימלי ברשת גם בתנאי משבר.

בנקודת 96 שעות (ארבעה ימים), הבעיה נוטה לעבור מאתגר "תפעולי" לאתגר "לוגיסטי-מבני". מערכות מים גדולות נשענות על אספקה רציפה של דלק לגנרטורים, כימיקלים לחיטוי, חלקי חילוף למשאבות ושסתומים, וכוח אדם מיומן. כאשר התחבורה נפגעת או התקשורת אינה מאפשרת תיאום, קווי האספקה הללו נשחקים, והיכולת להחזיק תפעול יציב יורדת. במערכת השפכים, השילוב בין הפסקת שאיבה לבין תנודות עומס הידראולי עשוי להוביל לגלישות מקומיות, להצפות קווים ולמפגע סביבתי שמייצר עומס משני על הרשויות ועל מערכת הבריאות. שיבוש באספקת חומרים אלו עלול לפגוע ביכולת לשמר איכות מים תקינה גם כאשר ניתן להמשיך להזרים מים בהיקף חלקי.

בנקודת 120 שעות, עלטה ממושכת מחריפה את פגיעותם של אזורים מסוימים ואת אי-השוויון התפקודי בין מרחבים. מתקנים מרוחקים, אזורים גבוהים ומתחמים הנשענים על שאיבה אינטנסיבית נוטים לחוות שיבוש ממושך יותר, בעוד שאזורים בעלי יתירות טובה יותר, בהם יש זמינות מקורות מים מקומיים, מאגרים גדולים יותר, או נגישות לוגיסטית עדיפה עשויים לשמר רמת שירות גבוהה יחסית. כך מתרחבים "פערי שירות" בין אזורים, והדבר מתחיל לזלוג גם למזון ולתעשייה (מכל הסוגים³³): מפעלים ושרשראות קירור נשענים על מים תברואתיים לתהליכים, ניקיון ובטיחות, ולכן פגיעה באספקת מים או באיכותם מתורגמת לשיבושים בייצור ובהפצה, ולא רק לקושי ביתי.

בשלב זה מתחדדת גם התלות בחומרי חיטוי, ובראשם כלור לשמירה על איכות מי השתייה. ככל שהאירוע נמשך מעבר למספר ימים, האתגר אינו רק לשמר זרימה, אלא להבטיח חיטוי רציף וניטור תברואתי גם כאשר תדלוק,

תחבורה ותקשורת תפעולית נשחקים. במצב כזה, מלאי כלור ויכולת תגבורו – בייצור מקומי או באספקה חלופית – עלולים להפוך למגבלה תפעולית, במיוחד כאשר נדרש תעדוף בין מתקנים ויישובים.

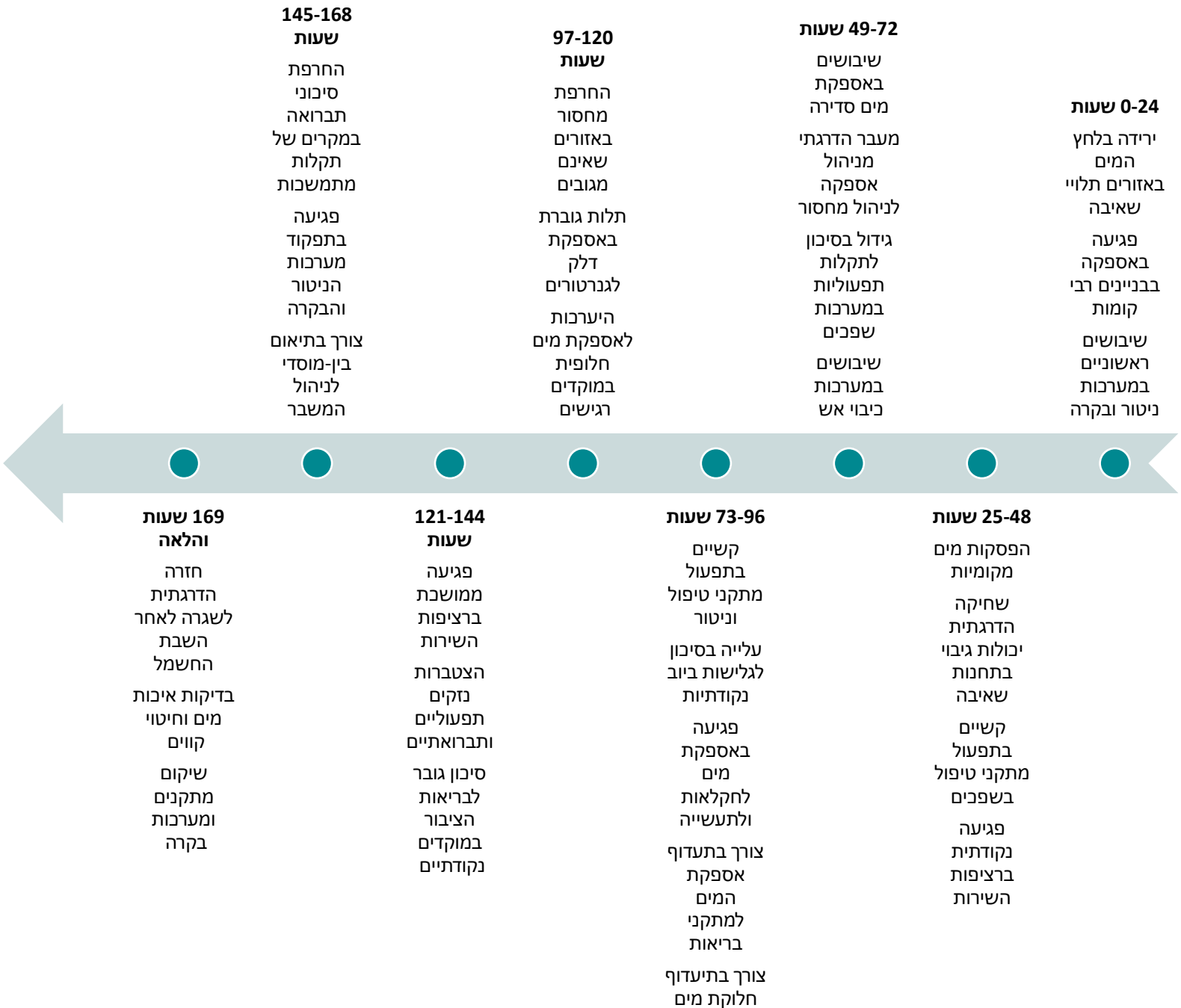
בפרק הזמן של 144 שעות (שישה ימים), ניהול מים הופך במובהק לאתגר של משילות ציבורית. נדרשת חלוקת משאבים, אכיפה של הגבלות שימוש, והיכולת להקים ולתפעל נקודות חלוקה פיזיות למים לשתייה, לעיתים תחת מגבלות תקשורת ותחבורה. חשוב לציין כי למחסור במים יכולה להיות השפעה שלילית על אוכלוסיות פגיעות – קשישים ובפרט קשישים מרותקים לבית, ילדים רכים ובעלי מוגבלויות. גם למועד האירוע בשנה יש משמעות כאשר באם יחול בתקופת הקיץ, יש לכך השפעה נוספת על עליה באירועי התייבשות וסיכון לחיים של אלו השוהים בבתיים ללא יכולת צינון וללא מים. חשוב לציין שבמשק המים קיימים מנגנוני חירום לחלוקת מי שתייה כאשר האספקה הרציפה נפגעת – מיכלים, מיכליות, ונקודות חלוקה יישוביות. ברמה המקומית, תאגידי המים מחזיקים יכולת בסיסית להפעלה כזו, ולצדם קיימת גם היערכות ברמה הארצית לתגבור בעת חירום. כמו כן, קיימים הסדרים עם גורמי ייצור, שינוע והפצה של מים מבוקבקים שנועדו לאפשר חלוקה מהירה בעת משבר. לכן, גם בעת עלטה, האתגר המיידי אינו מחסור מוחלט במי שתייה, אלא מהירות הפעלת מערכות החירום, קביעת סדרי עדיפויות, נגישות לאוכלוסיות פגיעות, ואיכות השירות. כמו כן ברמת השירותים הבייתיים בידי רשות המים מענים ל"חליף" שירותים לצורך סניטציה פתרון ישראלי כחול לבן כמענה לימים בודדים.

במקביל, תשתיות ביוב וניטור סביבתי שנפגעו דורשות תיקון, אך יכולת התיקון נשחקת כאשר חשמל ותקשורת אינם יציבים. בשלב זה קיים סיכון להסלמה תברואתית: שילוב של מים באיכות ירודה, גלישות שפכים, הצטברות פסולת ושחיקה בתפקוד שירותי בריאות קהילתיים.

בנקודת 168 שעות, השאלה המרכזית היא מה מכתוב את קצב ההתאוששות, והאם המשבר נוטה להתארך גם לאחר חזרה הדרגתית של חשמל. גם כאשר אספקת החשמל מתייצבת, חזרת השירות במים אינה מיידי. מתקנים עשויים לשוב לפעילות בתוך שעות, אך נדרשים הרצה מבוקרת, ייצוב לחצים, מילוי מאגרים, ובדיקות איכות לפני חזרה לרמת שירות מלאה. לעיתים נדרשים גם ניקוי קווים, שיקום מערכות בקרה, והשלמת מלאים של כימיקלים וחלקים מתכלים. אם התרחשו פגיעות סביבתיות – למשל גלישות שפכים – נוספת שכבת שיקום נפרדת הכוללת דיגום, ניקוי וניהול סיכונים בריאות, מעבר לעצם החזרת הזרימה. לכן, נקודת הסיום התפעולית אינה נקבעת לפי התשובה לשאלה "מתי חזר החשמל", אלא "מתי חזרה אספקת מים בטוחה ורציפה", ומהם צווארי הבקבוק שמונעים מעבר מחזרה חלקית להתייצבות מלאה.

במודל עניבת הפרפר, משפחת האיומים המרכזית כוללת הפסקת חשמל מתמשכת, כשלים בגיבוי (גנרטורים ותדלוק), פגיעה פיזית במתקנים וברכיבי הולכה ו/או שאיבה, ושיבושי סייבר במערכות בקרה וניטור. אירוע-העל הסקטוריאלי הוא אובדן אספקת מים תקינה ו/או כשל משמעותי בטיפול בשפכים, בין אם כמחסור כמותי ובין אם כפגיעה תברואתית. ההשלכות כוללות סיכון לבריאות הציבור, פגיעה בתפקוד מתקני בריאות, זיהום סביבתי, ושיבושים בייצור מזון ובשרשראות אספקה. גם כאן, המנגנונים החיוניים להתאוששות הם יתירות אנרגטית ברמת המתקן וברמת המערכת, ובראשם מדיניות תיעודף צרכנים ושירותים חיוניים, לצד כשירות לתפעול ידני מתורגל תחת מגבלות תקשורת, וניהול לוגיסטי סדור של דלק, כימיקלים וחלפים כך שניתן יהיה לשמר שירות מינימלי ולהאיץ התאוששות גם כאשר הסקטורים התומכים עצמם נפגעים.

תרשים 5: השלכות עלטה רחבת היקף על תשתיות ומערכות מים



פרק 7: עלטה במערכות חקלאות-מזון

אמרת כנף המיוחסת לוולדימיר איליץ' לנין קובעת: "כל חברה אנושית ניצבת מרחק שלוש ארוחות מכאוס".

אין הכרח לאמץ את הקביעה הקיצונית כדי להבין את העיקרון. אמנם, עלטה במערכת החקלאות-מזון אינה מובילה מיד לרעב המוני, אך היא יוצרת במהירות נזק תפקודי וחברתי משמעותי: אובדן מלאי בקירור, האטה בזרימת סחורות, פגיעה ביכולת התשלום והניהול, ולחצים חברתיים – עד כדי פאניקה, התנהגות עדרית ואלימות – שמתגברים כאשר אי-הוודאות גוברת, המזון אוזל, והמידע לציבור מוגבל.

יתירה מזאת, מערכות חקלאות-מזון (agri-food) הן שבריריות מכפי שאנו נוטים לדמיין. הן פועלות בשגרה על בסיס זרימה רציפה ומהירה של סחורות, מלאים "רזים" יחסית, ותלות גבוהה בתשתיות תומכות – חשמל, קירור, תקשורת, תחבורה ופיננסים.^{35,34}

בתוך כך, שרשראות אספקת מזון, תלויות בחשמל ובתקשורת כמעט בכל חוליה: גידול, מערכות השקייה ומשאבות, ציוד חקלאי, דישון, קטיף, צינון רפתות ולולים, קירור והקפאה לאורך האחסון והשינוע, אריזה ועיבוד, מערכות ניהול מלאי, מערכות תשלום וסליקה, הפעלת מרכזים לוגיסטיים (מרלו"גים) ומרכזי הפצה, ולעיתים גם אספקת מים תברואתיים לתהליכים שונים.

בהקשר זה, יש לציין כי מאגרי מים להשקיה חקלאית משלבים לעיתים גם יכולות ייצור אנרגיה סולארית. אולם, בהיעדר יכולת ניתוב והפעלה עצמאית של מערכות השאיבה בעת עלטה – לרבות תפעול islanded/מיקרו-גרید או פתרון גיבוי תואם – פוטנציאל זה אינו ממומש בפועל.

לכן, ההשפעה של עלטה מהירה וכרוכה באובדן מזון מסוגים מסוימים (תוצרת חקלאית ספציפית) מן השעות הראשונות.

בחלון של עד 24 שעות, הפגיעה הראשונה והמשמעותית ביותר היא שרשרת הקירור (cold chain). מזון טרי (בשר, ביצים ומוצרי חלב ולאחר מכן פירות וירקות) ומזון קפוא מתחיל לאבד איכות והופך בלתי-ראוי למאכל כאשר קירור אינו זמין, או פועל חלקית, וחלק מן הקמעונאים, המרלו"גים והיצרנים מסוגלים להחזיק גיבוי רק לזמן מוגבל, בהתאם לקיבולת הגנרטורים, מלאי הדלק וסדרי העדיפויות שלהם.

בזמן זה, ובמיוחד בסביבה עירונית צפופה³⁶, הלחץ הציבורי על נקודות המכירה ועל שרשראות ההפצה מתגבר. כאן מתרחשת לעיתים תזוזה בדפוסי התנהגות הציבור: מהתנהגות צרכנית רגילה להתנהגות של אגירה, עומסים ונטייה ל"ריצה למדפים", גם כאשר עדיין יש מלאי. תופעה זו, מהתנהגות עדרית בלתי-רציונאלית ועד להפגנת אלימות³⁷, מהווה מכפיל סיכון משמעותי בעת ניהול סיכונים משום שיש לה פוטנציאל להפוך שיבוש מערכתי-תפעולי מתון לבעיה חברתית חריפה: ביקוש מרוכז ותנועת מרוקן נקודות מכירה מהר, מייצר תורים וחיכוך, ומגדיל שחיקה של מערכות התשלום והאספקה (ככל שאלו קיימות).

בנוסף, יש להדגיש כי משק החי – ובפרט רפתות – תלוי לא רק בחשמל לצינון ולתפעול, אלא גם באספקת מים רציפה. במקרים רבים, האחריות להיערכות לחירום (לרבות אוגרי מים ונוהלי תפעול בעת שיבוש) מוטלת במידה רבה על המפעילים עצמם. בפועל, היערכות זו אינה תמיד קיימת או אינה מספקת, באופן שמגדיל את פגיעות הייצור כבר בימים הראשונים של עלטה מתמשכת, ובפרט כאשר הגישה לתדלוק, תחזוקה או אספקת מים משלימה מוגבלת.

בחלון של 48 שעות, הנזק מצטבר ונעשה מערכתי. אובדן מלאי בקירור מתרחב, שיבושי הפצה מתעצמים כאשר תחבורה עירונית נפגעת (בין היתר בשל רמזורים כבויים, עומסי תנועה ושינויים בנתיבי גישה), ומערכות תשלום

שאינו יציבות – בגלל היעדר חשמל ותקשורת – מקשות על קמעונאות ועל תפקוד רגיל של השוק. בשלב זה הפגיעה אינה רק בכמות המזון הזמין, אלא ביכולת להמיר מלאי חקלאי לסחורה נגישה לציבור: גם אם סחורה קיימת במחסנים, יכולת לתכנן הובלה, לבצע הזמנה, להוציא תעודות משלוח, ולתאם פריקה נפגעת. במקביל, מופיעים קשיי כוח אדם. עובדים מתקשים להגיע, חלקם נדרשים לבית בשל מצבי חירום אחרים, או השגחה על בני משפחה, והתפעול לוקה בחוסר ודאות.

במקביל, מתקנים תעשייתיים כמו מפעלי מזון, משחטות, מחסנים לוגיסטיים ומרכזי הפצה נפגעים הן בשל ניתוק מהרשת והן בשל תלות במערכות תקשורת ומידע בתפקוד ירוד³⁸. בשלב זה מתחיל להיווצר פער בין "מערכת קיימת" לבין "מערכת מתפקדת": יש מזון במדינה, אך היכולת להפעיל את המנגנון שמניע אותו לצרכנים נפגעת.

לאחר 72 שעות, מתחדד הצורך במעבר מחשיבה של "שוק מתפקד" לחשיבה של "רציפות תזונתית מינימלית" ותיעדוף. הדיון אינו עוד על הפסדי מלאי, אלא על הבטחת אספקה בסיסית לאוכלוסיות ובכללן אוכלוסיות פגיעות, על הפעלת נקודות חלוקה, ועל יצירת יכולת קירור מינימלית במוקדים קריטיים כדי למנוע אובדן מואץ של מזון (וגם תרופות).

פתרונות קיימים כוללים גיבוי קירור במרלו"גים, תיעדוף הפצה, מערכי חלוקה חלופיים ומלאי אסטרטגי, אך החסמים נוטים להיות מבניים: עלויות גבוהות של החזקה והפעלה בשגרה, שבריריות לוגיסטית כאשר תחבורה ותדלוק משובשים, וריכוזיות של נקודות כשל – קרי תלות במספר קטן של מרכזים גדולים ובצמתים לוגיסטיים שאם נפגעים, קשה לעקוף אותם במהירות.

בנקודת 96 שעות ניתן לצפות להסלמה. אם בימים הראשונים הבעיה הייתה בעיקר קירור ומלאי שנפגע, "ריקון מדפים", או השבתת משחטות, הרי שבשלב זה הבעיה נעשית לוגיסטית: שינוע, תיאום נהגים ותכנון מסלולים, הקצאת סחורות ותיעדוף.

כאשר אלה מתערערים, גם כאשר קיימת סחורה פיזית, היכולת להזיז אותה לנקודות הצריכה נפגעת. במקביל, מתחיל להיווצר פער בין תזונה בסיסית – מלאי מזון יבש במשקי בית, מים מבוקבקים, מוצרים בעלי חיי מדף ארוכים – לבין תזונה טרייה, מגוונת ובריאה; הפער הזה עשוי להשליך על בריאות הציבור, אם כי בעיקר בקרב ילדים, קשישים וחולים כרוניים; לא בהכרח במובן של "רעב", אלא במובן של "רעב סמוי" – הידרדרות איכות תזונה, החמרת מצבי חולי, וקושי לשמר שגרות טיפול.^{39,40}

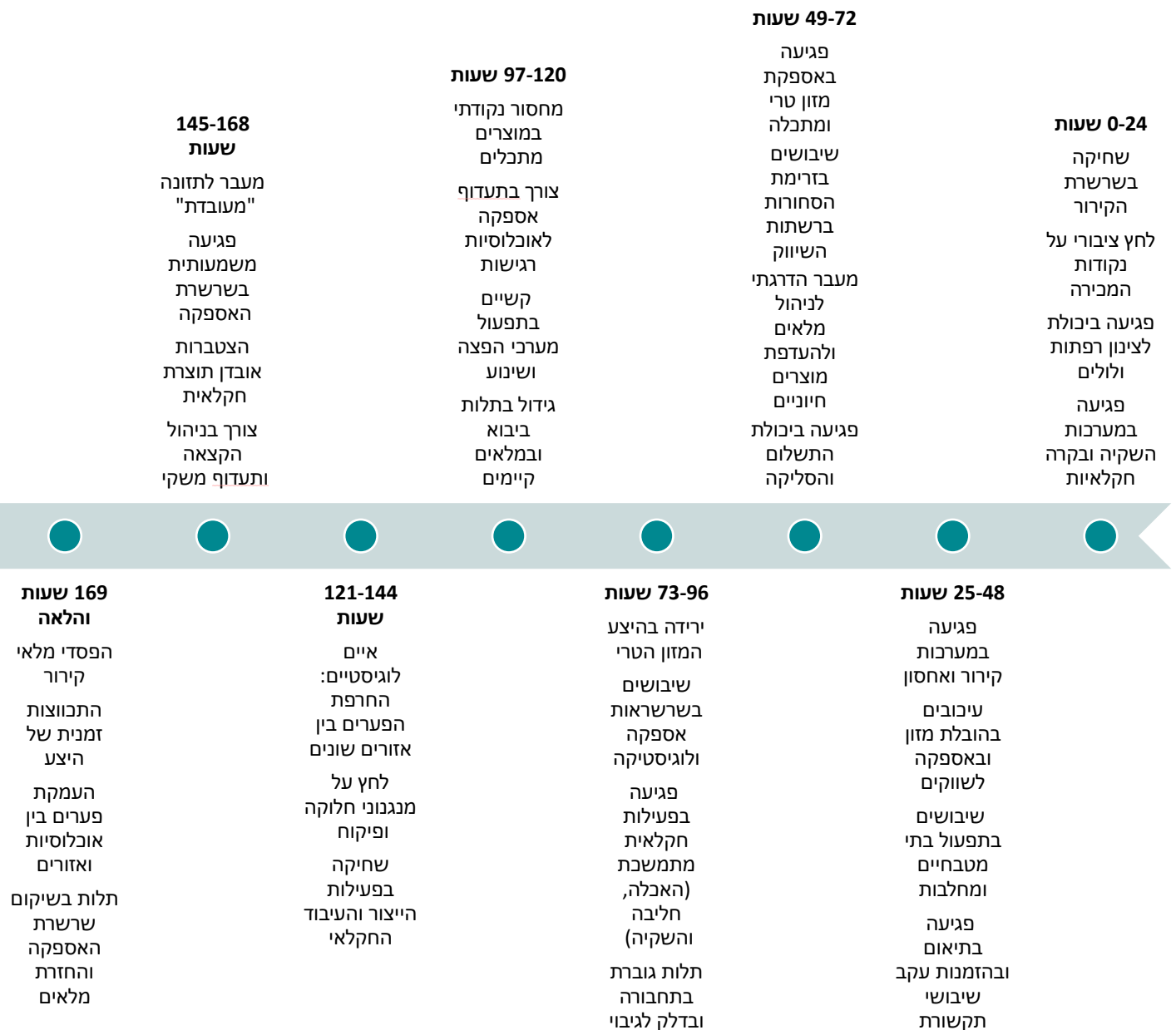
בנקודת 120 שעות אנו עשויים לחוות מצב של "איים לוגיסטיים". אזורים בעלי גישה תחבורתית טובה ויכולת גיבוי – למשל מרכזי הפצה עם גנרטורים ותדלוק סדור – יכולים להמשיך לתפקד חלקית, בעוד אזורים אחרים נשענים על חלוקה ציבורית או קהילתית. בשלב זה, פגיעה במערכות תשלום ובנגישות למזון מחמירה את המצב: גם אם חנויות פתוחות או סחורה מגיעה בכמות מסוימת, לא תמיד ניתן לבצע עסקה, והלחץ עובר למנגנוני חלוקה, פיקוח ותיעדוף במטרה לשמור על הסדר הציבורי.

לאחר 144 שעות סוגיית ביטחון המזון – במובנה הרחב (גישה פיזית, כלכלית ורציפה למזון בריא, מזין ומספיק, המאפשר חיים בריאים⁴¹) – נעשית אקוטית. כאשר שרשרת הקירור נקטעת לאורך ימים, הציבור נאלץ לשנות את התזונה לכזו המבוססת בעיקר על מזונות מעובדים, ואולטרה-מעובדים. במקביל, תעשיית המזון עצמה מתקשה לחדש ייצור בקצב מלא: מפעלים דורשים חשמל, מים, עובדים, קווי אספקה ותפקוד פיננסי שוטף; כאשר אחת מן השכבות הללו נשחקת, החזרה לשגרה היא תהליך מדורג ולא "מתג" שמרימים.

בנקודת 168 שעות (שבוע ימים), השאלה המרכזית היא שיקום רשת ההפצה וההחלפה בין מלאים שנפגעו למלאים חדשים. שבוע של עלטה – גם אם לא היה רציף בכל הארץ – עלול לגרום להפסדים כבדים של מלאי

בקירור, להתכווצות זמנית של היצע, ולהעמקת פערים בין אוכלוסיות ובין אזורים. לשון אחר, ההתאוששות אינה מתמצה ב"חזרת החשמל", אלא בהחזרת יכולות: ייצור, שינוע, אחסון, עיבוד, לוגיסטיקה, תשלומים ותקשורת. מכאן שהחוסן הסקטוריאלי תלוי במערכות תחבורה, פיננסים ותקשורת, וביכולת להגדיר מראש מהי "רציפות מינימלית" של קירור והפצה, אילו מוצרים מקבלים עדיפות, ומהו מנגנון הפעלה שמאפשר מעבר מסידורי חירום לשוק מתפקד.

תרשים 6: השלכות עלטה רחבת היקף על תשתיות ומערכות חקלאות-מזון



פרק 8: עלטה בתשתיות ומערכות תחבורה

סקטור התחבורה הוא מן הסקטורים בהם השפעת עלטה ניכרת לעין מיד. חלק גדול מן התפקוד השוטף בסקטור נשען על חשמל: בקרת תנועה עירונית, שילוט משתנה, תאורה, רמזורים, מערכות מסילה, מערכות בטיחות במנהרות, שערים וחניונים אוטומטיים, וכן מערכות תדלוק ותפעול תחבורה ציבורית.

המשמעות המיידית של החשכת תשתיות ומערכות היא פגיעה בבטיחות, והתארכות זמני נסיעה. היכולת לתעדף תנועה חיונית נעשית תלויה בכוח אדם, בתקשורת, ובסדרי עדיפויות שייכתן שהוגדרו מראש אך עלולים להיקבע בזמן אמת לפי תרחיש הייחוס.

ביממה הראשונה (24 שעות), הסיכון העיקרי הוא ירידה בבטיחות בדרכים בצד האטה חריפה וגודש חמור בניידות עירונית שהינה מרובת צמתים ורמזורים; סיכון לא מבוטל בהתחשב בכך שלמעלה מ-90% מתושבי המדינה מתגוררים בערים וביישובים עירוניים.

השבתת רמזורים, בקרת צמתים ותאורת כבישים מגדילה סיכוי לתאונות, ובפרט פגיעה בהולכי רגל, ומביאה לירידה חדה בקיבולת הצמתים והרשת העירונית. מאחר שכמעט כל נסיעה מתחילה או מסתיימת במרחב העירוני, הפגיעה מתפשטת במהירות גם לרשת הבין עירונית (שאף חלקים ממנה תלויים בצמתים מרומזרים), ועלולה להוביל לשיתוק תנועתו נרחב היוצר עומסי תנועה כבדים ומקשה על תנועת כוחות חירום ועובדים חיוניים. במקביל, מערכות מסילה, מנהרות וחניונים "חכמים" נשענים על חשמל לא רק להפעלה אלא גם לתאורה, אוורור, פיקוד ובקרה, ותפעול שערים. לכן התגובה הטבעית של מפעילים רבים תהיה מעבר לתפעול מוגבל או השבתה, מתוך שיקולי בטיחות⁴².

לשון אחר, המעבר המואץ להנעה חשמלית בתחבורה הציבורית משנה את פרופיל הסיכון של הסקטור בעת עלטה. חלק גדול מן המערכת תלוי לא רק בכבישים ובדלק, אלא גם בזמינות חשמל רציפה ותשתיות טעינה והזנה. הרכבות הקלות בירושלים ובגוש דן הן מערכות מסילתיות חשמליות הנשענות על הזנה חשמלית לאורך התוואי; גם אם קיימים גיבויים נקודתיים להפעלת מערכות בקרה, תאורה ותחנות, הנעת הרכבות עצמן תלויה באספקת חשמל למסילה, ולכן בתרחיש של עלטה מתמשכת ניתן לצפות להגבלה משמעותית ואף לעצירה רחבה של שירות מסילתי חשמלי. רכבת ישראל מציינת כי למעלה מ-70% מתוואי המסילה בארץ הוסבו לחשמל, כך שבכל שהחשמל מתרחב, כך גם עולה הרגישות המבנית של חלק מן השירות המסילתי לשיבושי חשמל מתמשכים.

במובן זה, היתרון המבני של מערכות להסעת המונים – קיבולת גבוהה, תדירות גבוהה יחסית וזכות-דרך ייעודית – מתקיים רק בהינתן אספקת חשמל רציפה למערכות ההנעה ולשכבות הבקרה והבטיחות הנלוות. לכן, בתרחישי חירום אין לנתק בין תכנון תחבורתי לבין מדיניות אנרגיה ותיעדוף תפעולי: נדרש להגדיר מראש אילו פונקציות תחבורתיות חייבות לקבל קדימות באספקת אנרגיה (למשל מקטעים קריטיים לפינוי, צירים המשמשים תנועה של כוחות חירום, או הפעלה מצומצמת של קווים מרכזיים), ומהו מודל "שירות מינימלי" שניתן להפעיל באופן בטוח גם כאשר אספקת החשמל אינה מלאה או אינה יציבה.

בהקשר זה, חשוב להדגיש שהאתגר אינו מוגבל למסילה בלבד. משרד התחבורה מדווח כי 32% מצי האוטובוסים העירוניים כבר מבוססים על אנרגיות חלופיות, בעיקר חשמל וגז טבעי, וכי 2035 נקבעה כשנת יעד למעבר מלא לאוטובוסים חשמליים⁴³. המשמעות התפעולית בעת עלטה היא תלות חדשה במקור אנרגיה שאינו ניתן לשינוע כרגיל: יכולת הפעלת אוטובוסים חשמליים תושפע ממועד הטעינה האחרון, מקיבולת הסוללות, מזמינות עמדות טעינה חלופיות (אם קיימות), וממשך ההפסקה – ולכן ההשפעה תהיה דיפרנציאלית בין אזורים ובין חלונות זמן.

באותה רוח, חדירת רכבים פרטיים חשמליים מוסיפה רובד נוסף של תלות בתשתית החשמל גם ברמת ההתניידות הפרטית, והשלכותיה נדונות בהמשך הפרק.

מעבר לזמינות האנרגיה, גם מבנה רשת התחבורה הציבורית קובע את החוסן התפעולי: רשת המבוססת על מעט קווים מרכזיים בתדירות גבוהה יכולה להתכנס מהר לשירות מינימלי שעדיין יאפשר נגישות רחבה, בעוד רשת מפוצלת של קווים רבים בתדירות נמוכה מתקשה יותר לשמור על סדירות ועל תיעדוף יעיל בחירום.

ברקע הדברים קיימות "נקודות כשל שקטות" כגון שערים חשמליים ומעליות חניה שעלולות להפוך למלכודת תפעולית מקומית: כלי רכב נתקעים במתחמים, נגישות מצטמצמת, וחלק מן הצי הזמין למשימות חיוניות "נעלם" מן המרחב התפעולי. לכאורה, מדובר בכשל מצומצם ותחום-היטב, אך מבט מקרוב חושף כשל עם פוטנציאל נזק מערכתי בעיקר כאשר מדובר בצי המשמש כוח אדם חיוני.

האתגר המרכזי בתרחיש עלטה אינו עצם החניה, אלא הפגיעה בניידות של כוח אדם חיוני וביכולת לנהל את התנועה ברמה העירונית והבין-עירונית. כשל ברמזורים, במערכות בקרה וביכולת התיאום בין גופים שונים פוגע בזרימת התנועה בצמתים ובצירים מרכזיים, ומקשה על הגעת צוותים חיוניים – רופאים, כוחות חירום, אנשי תשתית ולוגיסטיקה – ליעדם. בכך נפגעת לא רק התנועה עצמה, אלא קצב ניהול המשבר וההתאוששות של סקטורים התלויים בהגעה פיזית של כוח אדם ומשאבים.

בחלון של 48 שעות, תחום הבעיה מתרחב מתנועה ובטיחות אל אנרגיה ולוגיסטיקה, ובפרט לסוגיית התדלוק. משאבות דלק תלויות חשמל, ולכן היכולת לתדלק אינה פונקציה של מלאי דלק בלבד אלא גם של כשירות תפעולית: גיבוי אנרגטי בתחנות, נהלים להפעלה עצמאית, סדרי עדיפויות למי מתדלקים ומתי, ותיאום שיכול להיפגע כאשר התקשורת מוגבלת. כאשר תדלוק נעשה מצומצם או לא אחיד, נפגעת הן ניידות הציבור והן יכולת ההפעלה בחירום של סקטורים אחרים: גנרטורים בבתי חולים, מתקני מים, אתרי תקשורת ומרכזי הפצה – כולם זקוקים לדלק כדי להמשיך לספק שירות מינימלי.

יתירה מזאת, הואיל ומגזר התחבורה מסתמך על זמינות דלקים (בנזין, סולר וגז) – התלויים בעצמם ברשת חשמל לאורך שרשרת האספקה – מבתי זיקוק וצינורות הולכה, ועד תחנות התדלוק, בתרחיש עלטה ממושכת, אספקת הדלק עצמה תתקל בקשיים תפעוליים.

בהקשר זה, מינהל הדלק והגז במשרד האנרגיה והתשתיות נושא באחריות לרציפות תפקודית של משק הדלק במצבי חירום, ובמסגרת זו מוגדרת תשתית תחנות דלק ייעודיות – המכונות "תחנות צי ברזל" – שאמורות להמשיך לפעול בתנאי חירום, לפי רשימות שמפורסמות ומתעדכנות בידי המשרד. מבחינת ניהול סיכונים, המשמעות של "רשימת תחנות" היא קיומו של מנגנון תיעדוף בפועל: יכולת להבטיח נקודות תדלוק מתפקדות (באמצעות גיבוי אנרגטי, נהלי הפעלה, ותעדוף צרכנים חיוניים).

בחלון של 72 שעות, מערכת תחבורה לוטה בחשכה הפכת צוואר בקבוק מערכתי (chokepoint). בשלב זה השאלה אינה עוד "האם יש פקקים", אלא האם קיימת יכולת לשמר תנועה בסיסית של משאבים קריטיים במשק: דלק, מים, מזון, ציוד רפואי, צוותי תיקון וחלפים.

אם רמזורים אינם מתפקדים, הפתרון המסורתי – פריסת כוח אדם להכוונת תנועה בצמתים – נעשה תלוי במשאבי כוחות משטרה וביטחון, בתקשורת, בכוח אדם זמין וביכולת להחזיק משמרות לאורך זמן. במקביל, מערכות מסילה ומנהרות מציבות רף בטיחות בלתי-מתפשר: אוורור, תאורה ובקרה הם תנאי להפעלה, ולכן ברירת המחדל טיטה להגבלה או סגירה – החלטה שתגדיל בתורה את התלות והעומס בכבישים.

במקביל, מתחדדת מגבלה מערכתית נוספת: היעדר מנגנון סדור לניהול ביקוש לתנועה בחירום, קרי הגדרה מראש מי רשאי לנוע, באילו תנאים, באילו מסדרונות, ובאיזה אמצעי. בהיעדר כללים ותשתית הפעלה בשגרה (נהלי תיעודף, אכיפה, ומערך מידע לציבור), היכולת ליישם תיעודף אפקטיבי בזמן חירום מוגבלת, והמערכת מתקשה להבטיח תנועה רציפה של משאבים קריטיים.

מגבלה זו קשורה גם להיבט מבני עמוק יותר. בישראל, להבדיל ממרבית המדינות המפותחות, לא פועלות רשויות תחבורה מטרופוליניות וארציות המנהלות את מערכות התנועה והרמזורים ואת רשתות התחבורה הציבורית בזמן אמת. העדר מערכות ניהול מטרופוליניות המתכללות את כלל מערך התחבורה באופן שוטף בזמן אמת מגביל מאוד את היכולת לנהל את התנועה ומערכות התחבורה הציבורית בתרחיש עלטה, בהיעדר גוף מתכלל בעל סמכות, צוות מקצועי ופרוטוקולים ייעודיים לחירום, היכולת לנהל את התנועה ואת התחבורה הציבורית בתרחיש עלטה מוגבלת במיוחד.

במדינות שונות פועלים מרכזי ניהול תנועה מטרופוליניים (Traffic Management Centers) המנהלים את הרשת בזמן אמת ומפעילים פרוטוקולים ייעודיים בחירום. בישראל קיימות יכולות ניהול ובקרה מקומיות ומגזריות, אך נדרשת עבודה נוספת לפיתוח מנגנון מתכלל ואחיד להפעלה בקנה-מידה מטרופוליני בתנאי עלטה מתמשכת.

לצד הממד העירוני-יבשתי, יש להתייחס גם לתשתיות התעבורה הבינלאומיות – נמלי הים ושדה התעופה – המשמשות צומת לוגיסטי מרכזי למשק. פעילות מתקנים אלה נשענת במידה רבה על חשמל להפעלת מנופים, מערכות אחסון, בקרה ובטיחות. אף שקיימות מערכות גיבוי המאפשרות תפעול מוגבל, בתרחיש עלטה ממושכת צפויה ירידה בקיבולת הפריקה והטעינה והארכת זמני הטיפול במטענים. פגיעה מתמשכת בפעילות הנמלים עשויה להשפיע על זרימת דלקים, חומרי גלם ומזון; במצב כזה משק האנרגיה, המייבא פחם ונפט דרך הים, ידרש להישען יותר על מאגרים אסטרטגיים קיימים. גם שדה התעופה נשען על מערכות חשמל לתפעול מסלולים, ניווט ומיון מטען. בנמל התעופה בן גוריון פועל מרכז אנרגיה הכולל אספקת חשמל, קירור ומערך גיבוי, המאפשר המשך פעילות מוגבלת, אך בתרחיש עלטה רחבת היקף צפויה ירידה בהיקף התעבורה ובהגעת ציוד וצוותים החיוניים להתאוששות סקטורים אחרים.

בנקודת 96 שעות, מתחדדת התלות המשקית בדלקים. גם אם קיימות תחנות דלק המסוגלות לפעול על גיבוי, קיבולת התדלוק מוגבלת, ותיעודף לכוחות חירום ושירותים חיוניים צפוי ליצור מחסור במגזרים אחרים. מדובר במנגנון זליגת סיכונים קלאסי: שיבוש תדלוק מגביל את היכולת לתחזק גנרטורים בסקטורים אחרים, להגביל את תנועת המשלוחים ואספקת מצרכים, לשנע חלפים וכוח אדם, ולכן עלטה בתחבורה מהווה גם היא "מכפיל סיכון".

לאחר 120 שעות (חמישה ימים), ניהול תשתיות ומערכות תחבורה נדרש לאזן איזון עדין בין שני צרכים סותרים לכאורה: מצד אחד, צמצום תנועה אזרחית במטרה להפחית תאונות דרכים, עומס ובלאי; מצד שני, שמירה על "מסדרונות לוגיסטיים מהירים" לתנועה של עובדים חיוניים ואספקת לאספקת מזון, מים, ציוד רפואי ודלק במהירות גבוהה ולפי צורך.

בשלב זה שחיקת כוח אדם נעשית גורם מגביל: עובדים מתקשים להגיע לעבודה או לשוב לביתם, מערכי משמרות מתערערים, ושירותים חיוניים פועלים בתת-תקינה בדיוק בנקודה בה נדרשת תפוקה גבוהה.

בנקודת 144 שעות (שישה ימים), ניתן לצפות שהפגיעה תתרחב לשירותים עירוניים חיוניים כמו פינוי פסולת והובלת מים, שגם הם תלויים בצירי תנועה פתוחים וביכולת לתדלק צי רכב כבד.

בנקודת 168 שעות, לאחר שבוע של שיבושי תחבורה, וגם לאחר חזרת החשמל, תשתיות ומערכות תחבורה צפויות להתאושש לאיטן.

תקלות בצידוד, שחיקה ובלאי, דחיית תחזוקה ושיבוש מערכי בדיקה מצטברים. חלק מן המערכות – בעיקר מסילה ומנהרות – עשויות לדרוש בדיקות בטיחות לפני חזרה מלאה. לכן זמן החזרה לשגרה מלאה אינו מקביל לזמן חזרת החשמל.

מכאן גם שהיערכות תחבורתית לעלטה אינה מסתכמת בפריסת גנרטורים, אלא מחייבת תכנון מוקדם של מסדרונות תנועה, נהלי תיעודף, תדלוק חירום, והטמעת שיקולי תחבורה כמרכיב מפתח בתכנית ניהול המשברים וההתאוששות של כלל הסקטורים.

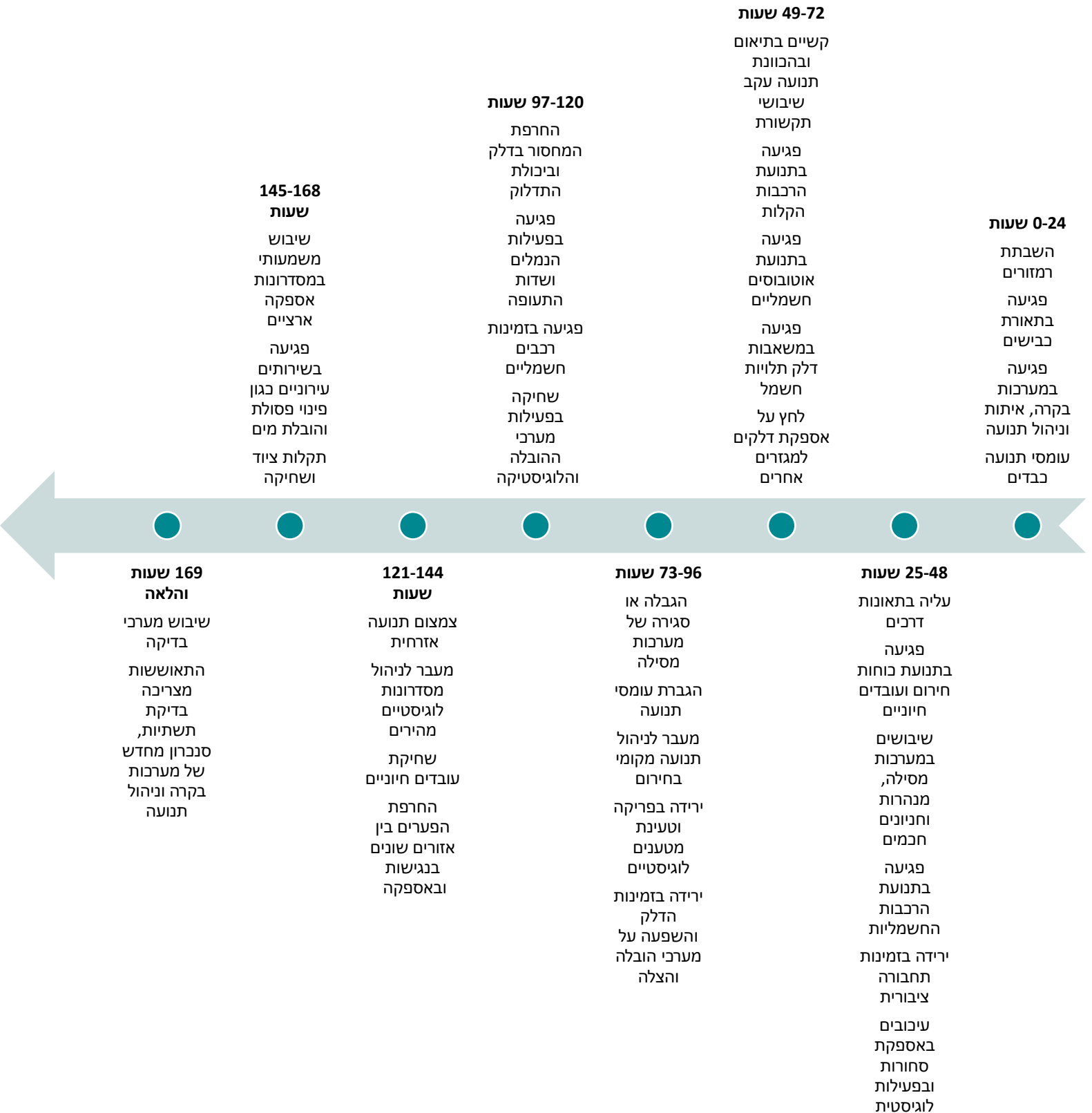
החדירה הגוברת של רכבים חשמליים (EV) מוסיפה מורכבות לפרופיל הסיכון של עלטה, משום שהיא משנה את היחס במשק בין "אנרגיה לתנועה" (דלק) לבין "תשתית לתנועה" (חשמל). לפי שעה, שיעור הרכבים הפרטיים המונעים בחשמל עומד על כ-4% (לא כולל רכבים היברידיים המהווים כ-11.5%)⁴⁴. תחזית משרד האנרגיה היא הגעה לשיעורי חדירה גבוהים משמעותית עד שנת 2030, עם כ-30% מהרכבים הפרטיים בישראל, מה שיחייב צריכה של כ-4% מצריכת החשמל המשקית⁴⁵. עד שנת 2050, מספר זה צפוי לעלות לכ-7.5% מצריכת החשמל המשקית. מצד אחד, המעבר להנעה חשמלית אפוא מגדיל תלות: תלות באספקת חשמל עצמה ותלות בתשתיות טעינה – עמדות ציבוריות, תשתית ביתית, ולעיתים גם מערכות ניהול חכמות שמחייבות תקשורת. בתרחישי עלטה, המשמעות המעשית היא שרכבים שנשענים על טעינה ציבורית או על רשת ביתית לא זמינה מאבדים בהדרגה את יכולת ההתניידות¹⁵, ובייחוד כאשר העלטה מלווה גם בשיבושי תקשורת שמקשים לאתר עמדות פעילות או לנהל תשלומים. מצד שני, בטווח הבינוני-ארוך קיימת אפשרות עקרונית להפוך חלק מן הצי החשמלי ממשמש פסיבי ברשת למשאב אנרגטי ומקור חוסן מבוזר. יכולות Vehicle-to-Grid ו Vehicle-to-Home (V2H) – (V2G) עשויות, בתנאים מסוימים, לאפשר לרכב להזין חשמל בחזרה לבית או לרשת, ובכך להאריך את "חלון התפקוד" של מערכות וצרכנים מסוימים ואף לתמוך בניהול עומסים.^{47,46}

אולם כדי שיכולת כזו תנוצל בעת עלטה, היא מוכרחה להיות מעוגנת בהסדרה רגולטורית, הנדסית ותפעולית: תקינה מחייבת (לרבות מניעת "הזנה לאחור" מסוכנת לצוותי תיקון), ציוד דו-כיווני מתאים, מדיניות תעריפים ותמריצים, נהלי בטיחות, וסדרי עדיפויות שמגדירים מה מותר להפעיל, לכמה זמן, ובאילו תנאים. ללא שכבות ההסדרה הללו, פוטנציאל ה-V2H/V2G נשאר בעיקר תיאורטי, ובאירוע אמת הוא ייותר בלתי-ממומש בקנה מידה מערכתי.^{49,48}

לשון אחר, במונחי ניהול-סיכונים, בשעת עלטה רכבים חשמליים הם בו-זמנית הזדמנות ומגבלה. הם עשויים להגדיל יתירות, גמישות וחוסן אך רק אם הם זוכים להתייחסות בתכנון משקי רחב; עם כללי משחק ברורים, תרחישי הפעלה, ותיאום בין חשמל, תקשורת ותחבורה. בהיעדר מסגרת כזו, רכבים חשמליים הופכים לאילוף תפעולי שמגדיל תלות ברשת החשמל והטעינה.

¹⁵ יחד עם זאת, טווח 300-500 ק"מ לטעינה מלאה, כאשר ממוצע הנסועה בישראל עומד על כ-15 אלף ק"מ בשנה¹⁵ (בהנחה פשטנית כ-40 ק"מ ליום בממוצע). קרי, רכבים כאלו יוכלו להמשיך ולתפקד כשבוע.

תרשים 7: השלכות עלטה רחבת היקף על תשתיות ומערכות תחבורה



פרק 9: עלטה בתשתיות ומערכות בריאות

מערכת הבריאות הציבורית, המהווה רכיב חיוני בחוסנה של החברה בישראל, נדרשת לגיבוי אנרגטי בעתות חירום. בד בבד, זהו סקטור שהביקוש לשירותיו גדל בזמני משבר.

השירות במערכת הבריאות הציבורית ניתן על ידי קופות החולים המבטחות את כלל אזרחי מדינת ישראל ואחראיות על מתן שירותי הבריאות בקהילה בשגרה ובחירום, ועל ידי בתי החולים המעניקים שירות רפואי במצבים מורכבים המצריכים אשפוז וביורר במסגרת בית החולים.

ברפואת הקהילה, כלל השירות הרפואי נשען על חשמל ותקשורת על מנת לשמור על רצף טיפולי: מערכות המידע הרפואי במרפאות הרופאים ומקצועות הבריאות, ובבתי מרקחת ומכוני הקופה; שרשרת הקירור של תרופות וחיסונים; הטיפול הביתי לחולים המרותקים לביתם; ועוד. במצבי עלטה, חלק ממערכות אלו מגובות לזמן נוסף. יחד עם זאת, הצורך הבריאותי ומצב החירום הלאומי צפויים לגרום לקפיצה בביקוש לפניות לרופאים ולמוקדי החירום, לרכישה ולאגירה של תרופות, ועוד. כפועל יוצא, צפויה בהמשך הידרדרות מצטברת בזמינות שירותים, במלאים ובתיאום. בהיותה של רפואת הקהילה חומת המגן בפני הצפת בתי החולים, ההידרדרות הזו צפויה לחלחל לבתי החולים – באמצעות עליה בביקוש לשירותי רפואה דחופה, עומסים על חדרי מיון, ובהמשך עליה בשיעורי אשפוז של מטופלים שניתן היה לטפל בהם בבטחה בקהילה. כך, מערכת הבריאות הציבורית האיכותית בישראל, אשר פועלת ללא יתירות גם בשגרה, עלולה למעשה להגיע למצב שבו חלים עיכובים בטיפול רפואי חיוני וקיימת פגיעה בחיי אדם, גם אם החשמל במתקני קופות החולים ובבתי החולים נשמר.

יתירה על כך, מי שצפויים להיפגע במיוחד הם החולים המורכבים ביותר מבחינה רפואית, ואלו הנמנים על האוכלוסיות המוחלשות במדינת ישראל – תושבי הפריפריה ובעלי המעמד הסוציאקונומי הנמוך – אשר גם בשגרה נגישותם לשירותי הבריאות נמוכה יותר. ההערכות הן שכיום יש בישראל כ-47 אלף מטופלים מונשמים ונתמכי נשימה, התלויים בדרגות שונות במקור מתח חשמלי זמין. מספר החולים עם צרכים רפואיים מיוחדים המיועדים לפינוי בעת עלטה הוערך עי משרד הבריאות בכ-5,000 מטופלים, כתלות בחומרת מחלתם ובמענה הגיבוי הקיים בבית המטופל⁵⁰.

היבט נוסף על הפגיעה באיכות ובזמינות שירותי הבריאות לחולים עצמם הוא ההיבט הכלכלי והחברתי – ההערכה היא כי כיום קיימים כ-1.5 מיליון מטופלים עיקריים בחולים המורכבים⁵¹: מדובר בבני משפחה אשר נושאים בנטל הטיפול בחולה המורכב במשפחתם, ובעת תרחיש עלטה על היבטיו השונים גם תפקודם במשק כעובדים נפגע, וזאת לצד פגיעה בצרכיהם הבריאותיים.

בתי החולים הם נקודת מבחן מובהקת לחוסן אנרגטי רפואי. ככלל, בתי חולים נשענים על ארכיטקטורת חשמל ייחודית: הפרדה ללוחות ולמעגלים חיוניים לעומת צרכנים שאינם חיוניים, מערכות אל-פסק (UPS) לצרכנים שבהם אסורה ההפסקה הקצרה ביותר, וגיבוי באמצעות גנרטורים עם מתגי העברה אוטומטיים (ATS) שנועדו להעביר את ההזנה מהרשת הציבורית להזנה עצמאית בתוך שניות⁵². חובת התקנת גנרטורים במתקנים רפואיים ובתי חולים בישראל מעוגנת בתקנות החשמל (מתקני חשמל באתרים רפואיים)⁵³ ובנהל E-01 של משרד הבריאות⁵⁴, המחייבים הזנה חלופית אמינה למערכות מצילות חיים, חדרי רגישים (חדרי ניתוח, טיפול נמרץ, חדרי לידה) ותאורת חירום במקרה של הפסקות חשמל, כדי להבטיח את רציפות הטיפול. כמו כן, בתי החולים מחויבים להחזיק בכמות דלק שתאפשר את הפעלת כלל הגנרטורים למשך 72 שעות¹⁶.

¹⁶ רוב בתי החולים מחוברים לרשת החשמל במתח גבוה מאחר שההספק הנדרש להפעלתם חורג מזה של חיבור במתח נמוך. כמו כן, חיבור במתח גבוה נחשב אמין יותר, שכן רשתות מתח גבוה נהנות מיתירות ותפעול יציב יותר ביחס לרשתות

גם כאשר התכנן ההנדסי של בית החולים תקין והגיבוי "עובד", אין פירוש הדבר שהמערכת יכולה להחזיק כך לאורך זמן וללא מגבלה. בפועל קיימים ספי זמן תפעוליים ברורים: כמה שעות או ימים ניתן להפעיל גנרטורים לפני שמלאי הדלק הופך גורם מגביל; עד כמה ניתן לסמוך על ציוד שעובד ברצף ללא תחזוקה ותיקונים; האם קיימים צוותים זמינים להפעלה, לתדלוק ולתיקון לאורך משמרות מתמשכות; האם יש חלפים וצרכים מתכלים (שמנים, מסננים, מצברים, רכיבי בקרה) בהיקף מספק; והאם ניתן לנהל תיעודף עומסים באופן שמונע תנודות והפסקות במחלקות הקריטיות לאורך זמן, גם כאשר חלק מהמערכות התומכות חייבות להצטמצם או להיסגר.⁵⁵

במהלך 24 השעות הראשונות, בתי חולים צפויים לפעול במתכונת "שגרה בחירום": צמצום פעילות אלקטיבית ותיעודף רפואת חירום, טיפול נמרץ, חדרי לידה ויחידות קריטיות כגון מעבדות. במקביל, השוליים המערכתיים נפגעים. מרפאות קהילה מתקשות לשמר רציפות (היכן שהן פתוחות), מטופלים בבית עם ציוד תומך חיים (למשל מחוללי חמצן, מערכות הנשמה ביתית) הופכים מוקד סיכון, ונדרש מנגנון סיוע קהילתי ממוסד. על קופות החולים לזהות מוקדם מטופלים תלויי חשמל ולתת להם מענה, ובמקביל להעביר מידע ולשתף פעולה עם הרשויות המקומיות ושירותי החירום האזוריים.

לאחר 48 שעות, הבעיה איננה עוד הנדסית כי אם ניהולית ורפואית. אם רשתות תקשורת נחלשות, נפגעת היכולת לגשת לרשומות רפואיות, לתאם אמבולנסים, לנתב ביקוש לשירות רפואי בין מוסדות, ולנהל תמונת מצב רפואית-אזורית. במקביל, התלות במים הופכת מוחשית יותר: גם בית חולים שמחזיק אמצעי גיבוי מתקשה לתפקד ללא מים תקינים להיגיינה, סטריליזציה ותברואה. כאן חשוב להתנסח במונחים תפעוליים: "רציפות תפקודית רפואית" אינה פונקציה של חשמל גרידא, אלא של סל תשומות חיוניות – מים, מזון, דלק, תקשורת, תרופות וכוח אדם – שכל אחת מהן עלולה להפוך גורם מגביל.

בחלוף 72 שעות, ובהינתן קשיים באספקת דלק, עלולה להיפגע גם "הליבה הקלינית": המשך פעולה של מחלקות הטיפול לרבות טיפול נמרץ, מחלקות לרפואה דחופה, חדרי ניתוח, ומכונים. זאת, בצד שחיקה מדודה של שירותים תומכים (למשל צמצום העבודה של מעבדות מסוימות, תיעודף ביצוע בדיקות עזר והדמיה, אחזקת מערכות מיזוג בהיקף מלא, חלק מתשתיות תקשורת, ועוד). הדבר מחייב, בין היתר, שקלול תמורות מחריף והולך בניהול קונפליקטים פנימיים, הקצאת משאבים ותיעודף; מי מתקבל לאשפוז, מי מועבר ולאן, מי יחובר לאמצעי ניטור ואף למכשירי הנשמה – על כל המשתמע; אילו פרוצדורות נדחות; איך מצמצמים "חוב טיפולי-קליני" עתידי.

לאחר 96 שעות, השחיקה התפעולית הופכת לשיקול מרכזי בהפעלת המערכת, וכוח האדם הופך גורם מגביל. קושי להגיע למשמרות בשל תחבורה משובשת, עומסי משפחה והיעדר שירותים, ועייפות מצטברת של הצוותים הרפואיים בתנאי עבודה ועומסים חריגים. במקביל, הביקוש לשירותי רפואה צפוי לזנק בשל גורמי סיכון "משניים" – תאונות דרכים עקב שיבושי תנועה, החמרת מחלות כרוניות עקב אי-נגישות לטיפול רפואי ותרופות, וסיכוני תברואה שונים, בעיקר אם מערכת המים נפגעת. כלומר, הביקוש גובר בשעה שההיצע נשחק ואף מופחת באופן משמעותי.

בהקשר זה של מערכות מים, לפי דוח מבקר המדינה בנושא אספקת מי שתייה בשעת חירום, ההיערכות התפעולית של בתי חולים כוללת דרישה לאיגום מים לשלוש יממות לצרכים חיוניים, ונמצאו פערים בפועל בחלק

מתח נמוך. במרבית בתי החולים קיימת הזנה כפולה במתח גבוה: קו הזנה ראשי וקו נוסף המשמש לגיבוי. לעיתים, שני קווי ההזנה מגיעים משתי תחנות משנה שונות, ולעיתים הם מוזנים משני שנאים נפרדים באותה תחנת משנה – כך שנשמרת יתירות גבוהה יותר באספקת החשמל למתקנים רפואיים. לעומת זאת, במרפאות ושירותי בריאות בקהילה רמת הגיבוי האנרגטי נמוכה יותר. רובן המכריע מוזן בהזנה אחת, במתח נמוך, ומערך הגיבוי שלהן כולל כמות דלק המספקת להפעלת גנרטורים ל-24 שעות.

מבתי החולים. דו"ח זה ממחיש כיצד תלות בסיסית בסקטור אחר, כמו מים, הופכת גורם מגביל גם בתנאי גיבוי חשמלי.

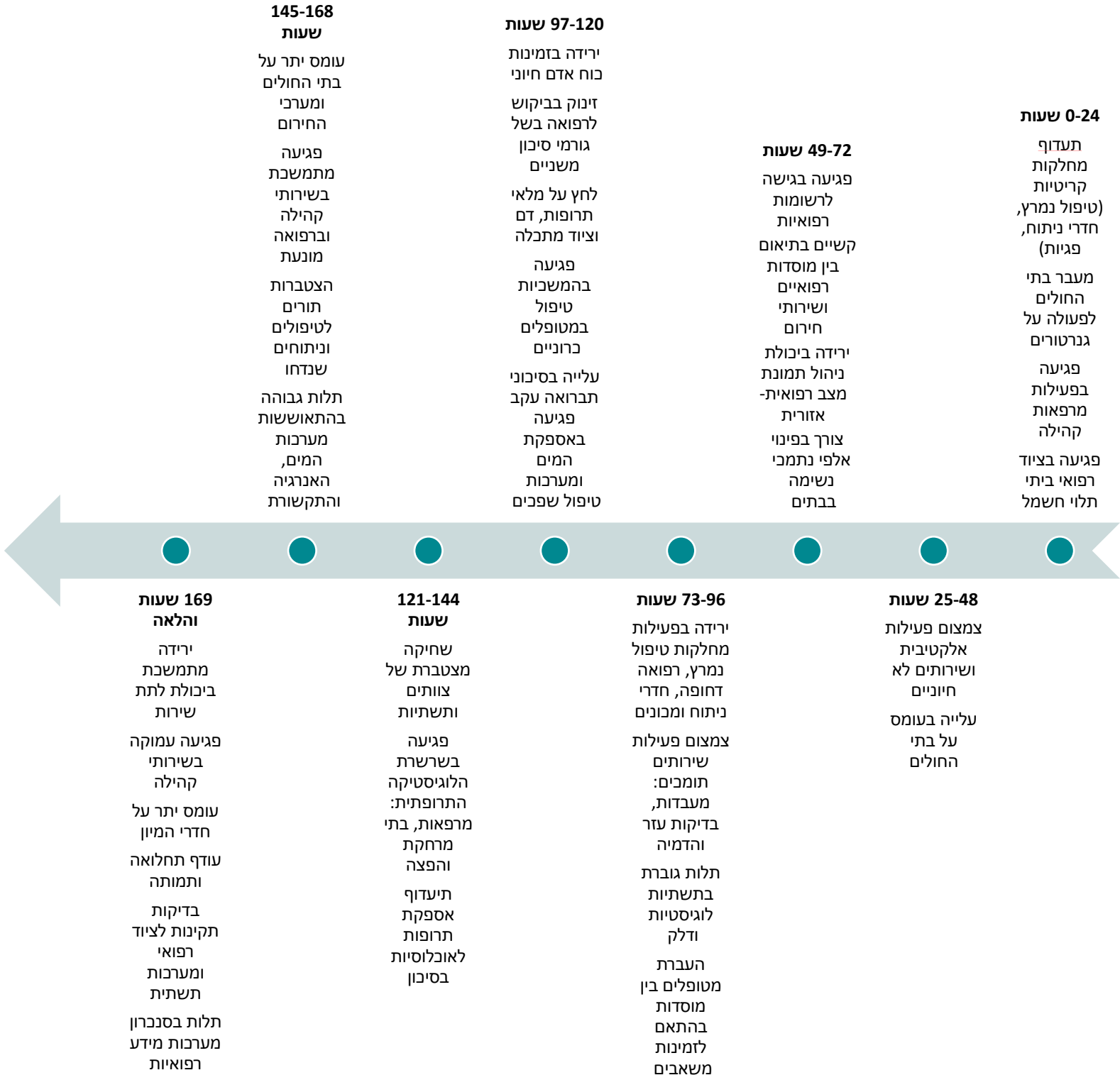
ב-120 עד 144 שעות (ביממה החמישית והשישית), ככל שאספקת הדלק חלקית, מתחדדת סוגיית שרשרת הקירור הרפואית והלוגיסטיקה התרופתית. תרופות מסוימות וחיסונים דורשים טמפרטורה מבוקרת, כמו גם תיעוד רציף. גם אם בתי חולים מצליחים לשמור על תנאים נאותים, נקודות הקצה – מרפאות, בתי מרקחת והפצה – מתועדפות בעדיפות נמוכה ולכן פגיעות. כאן נדרשת מחשבה מבעוד מועד. נדרשים פרוטוקולים לריכוז מלאים במוקדים עמידים (מקוררים), נדרש תיעודף אספקה לאוכלוסיות בסיכון (לרבות איתור מוקדם), ונדרש קיצור מסלולי הפצה – תוך מודעות לכך שללא תקשורת יציבה תיאום זה נעשה מורכב.

בנקודת 168 שעות, שבוע של שיבושים והפרעות יוצר סיכון מהותי ל"קריסה תפקודית": ירידה מתמשכת ביכולת לתת שירות, פגיעה עמוקה בשירותי קהילה, עומס יתר על חדרי מיון, עודף תחלואה ותמותה, והצטברות תורים לטיפולים וניתוחים שבדחו. "החוב הטיפולי" ככל שהצטבר, ישולם בשבועות הבאים לאחר חזרת החשמל, אך עבור מטופלים מסוימים עלול להיות מאוחר מדי.

כמובן, יש לקחת בחשבון שעלטה עלולה להוביל לגל פציעות בדרגות שונות של חומרה; תאונות במשקי בית או בעבודות שיקום כתוצאה מעבודה בחושך, הרעלות מאדי דלק בגנרטורים, שריפות, התייבשות או מכת חום בהיעדר מיזוג אוויר או פגיעות קור (תלוי עונה) ועוד. כאמור, הפגיעים ביותר הם החלשים ביותר; קשישים, ילדים בעלי צרכים מיוחדים, חולים קשים, תושבי פריפריה, ובני המעמדות הסוציאקונומיים הנמוכים.

על כן, חוסנה של מערכת בריאות הציבור בתרחיש עלטה אינו נגזר רק מהיתירות האנרגטית של בתי חולים וקופות החולים, אלא מיכולתה של מערכת רפואית רב-שכבתית לפעול בתנאי מחסור מתמשך בתשומות שונות. היכולת לאסוף מידע בזמן אמת, לתאם בין מוסדות ולתעדף משאבים בין רפואה דחופה, רפואה בקהילה, ולוגיסטיקה רפואית היא שתקבע את רמת התפקוד של המערכת. במלחמת חרבות ברזל, האגף לשעת חירום במשרד הבריאות הקים מרכז שליטה ייעודי. בתרחיש עלטה ממושכת, משרד הבריאות נדרש לנהל את מכלול ההיבטים בבריאות לרבות איסוף מידע בזמן אמת אודות מצב המוסדות הרפואיים אל מול צרכי האוכלוסיה, תיאום וניתוב מיטבי בהתאם לשינויים הנדרשים.

תרשים 8: השלכות עלטה רחבת היקף על תשתיות ומערכות בריאות



פרק 10: עלטה בתשתיות ומערכות בנקאות ופיננסיים

בדומה לתשתיות תקשורת, המערכת הבנקאית והפיננסית מהווה שכבת-בסיס, או תנאי בסיס, לתפקודן של מערכות אחרות. בנקאות איננה רק "ענף שירות"; היא מארג של מנגנוני תשלום, סליקה, נזילות ואמון שמאפשרים למשק להמשיך לפעול גם כאשר תנאי השגרה חדלים להתקיים: תשלום עבור דלק ולוגיסטיקה, רכישת מזון ותרופות, תשלום שכר לעובדים חיוניים, התקשרויות בין ספקים, והיכולת של הציבור להבין שהמשק עודנו "מתפקד" ולא מדרדר לכאוס.

מבחינה טכנית-תפעולית, ובין-מגזרית, התלות של מערכת הבנקאות היא כפולה: תלות בזרם חשמל ותלות בתקשורת, הן "במרכז" והן "בקצה". במרכז נמצאות מערכות הליבה של הבנקים ומרכזי המחשוב (כולל אתרי גיבוי), לצד תשתיות סליקה ותשלום לאומיות; בקצה נמצאים הכספומטים, הסניפים, הקופות, המסופים בבתי עסק, היישומים הדיגיטליים וערוצי השירות לציבור ולעסקים.^{57,56}

בישראל ראוי להבחין בין שכבות ותשתיות תשלומים: מערכת זה"ב (RTGS) של בנק ישראל לסליקה בזמן אמת ובאופן סופי של תשלומים גדולים ובין-מערכתיים; מערכות חיובים וזיכויים של מס"ב (מרכז סליקה בנקאי) כתשתית מרכזית להעברות ולהוראות קבע ופעילות בנקאית שוטפת; ותשתיות שב"א (שירותי בנק אוטומטיים) בתחום מיתוג מסרים, ניתוב וסליקה בכרטיסי חיוב ובממשקי הקצה (לשון אחר, תשתית מיתוג וניתוב של עסקאות ותשלומי כרטיס בקצה שמחברת בין בתי העסק, המסלקות והבנקים בזמן אמת). בנק ישראל מרחיב על מערכות התשלומים ועל יציבות ויעילות מערכתית, מדגיש שמדובר בתשתית קריטית ולא רק בפעילות מסחרית, ומהווה מרחב טבעי לדיון מפורט יותר בעלטה במגזר זה.

יש לציין שמערכת הבנקאות מחויבת להתחשב באיומים שונים על יציבותה ונושא זה מוסדר בהוראת נוהל בנקאי תקין 58355⁵⁸ שמתייחס בין היתר לשיבושים תפעוליים ותשתיתיים שונים, בין היתר כתוצאה מפגיעה בתשתיות חשמל ותקשורת, אובדן נגישות לאתרים קריטיים, ומגבלות תנועה וכוח אדם.

ב-24 השעות הראשונות של עלטה, הפגיעה הנראית לעין נוצרת בעיקרה "בקצה". הציבור והעסקים חווים קושי בגישה למזומן ובביצוע עסקאות, לא משום שהכסף "נעלם", אלא משום שנקודות הממשק – כספומטים, קופות, מסופים, סניפים ועמדות שירות – תלויות בחשמל ובקישוריות.

גם כאשר יש חשמל נקודתי (למשל גנרטור במתחם מסחרי או בסניף), תשלום דיגיטלי אינו מובטח אם ערוצי תמסורת הנתונים אינם יציבים, משום שרוב העסקאות דורשות הרשאה, אימות וניטור בזמן אמת.

כבר בשלב זה נפער פער בין "מערכת פיננסית קיימת" לבין "מערכת פיננסית נגישה". ייתכן שמערכות הליבה ממשיכות לעבוד במרכזי מחשוב מגובים, אך היכולת לבצע עסקה בקצה נעצרת, והמשק חווה חסימה תפקודית מיידית.

ב-48 שעות, ההפרעה עוברת מן הפרט אל המשק. כאשר תשלומים וסליקה אינם רציפים, שרשראות אספקה מתקשות לתפקד, עסקים מתקשים לשלם לספקים, וחלק ממפעלי ייצור ושירותים עלולים להאט או לעצור משום שהם אינם יכולים לנהל תזרים, או רכש שוטף.

בשלב זה מתחדדת ההבחנה המערכתית בין "מרכז מתפקד" (מערכות ליבה פועלות) ל"קצה בלתי-מתפקד" (לא ניתן לקנות, לשלם, להוציא מזומן ולהעביר ערך בנקודות המגע עם הציבור).

ככל שהעלטה מתרחבת מסקטור לסקטור, כך גם הלוגיסטיקה ששומרת על המערכת יציבה הולכת ונשחקת – אבטחה, כוח אדם, תדלוק אתרי קצה, זמינות מרכזי שירות ושינוע מזומנים.

כמובן, מעבר להפרעות בתשלומים, עלטה עלולה להשפיע גם על השוק ההוני והיציבות המאקרו-כלכלית. מסחר בבורסה ושירותי ברוקראז' (תיווך פיננסי) נשענים אף הם על חשמל וקישוריות רציפה. גם אם מרכזי המחשוב של הבורסה לניירות ערך ומוסדות פיננסיים מגובים, שיבוש נרחב בקישוריות של בנקים, בתי השקעות ומשתתפים מרכזיים יובל לצמצום המסחר, השעיית פעילות, או לתנודתיות חריגה בשל אי-ודאות.

ב-72 שעות, השיבוש הפיננסי הופך לאתגר של אמון וסדר ציבורי. לאחר שלושה ימים, כאשר חלקים גדולים בציבור מיצו את דרבות המזומן שלהם עבור מוצרים חיוניים (וחלק ניכר מהמלאי הביתי של מזון ומים נצרך), הכשלים במערכת הפיננסית אינם עוד "שירות שנפגע" אלא מכפיל-סיכון: אם תושבים אינם יכולים לשלם או למשוך מזומן, נפגעת היכולת לרכוש דלק, מים ומזון, לשלם לספקים, ולשמור על שגרה בסיסית. מנגנון התיאום של המשק קורס. הלחץ הציבורי והעסקי גובר. למען הדיוק, הלחץ הציבורי, הכלכלי-חברתי, נובע פחות מחשש לקריסת מוסד פיננסי, אלא מהיעדר נגישות.

לצד הפגיעה בנגישות וביכולת לבצע תשלומים, ככל שהשיבוש נמשך מתחדדות גם השלכות עומק הנוגעות למבנה המערכת הפיננסית עצמה – והן אינן אחידות בין תת-מגזרים (בנקים, ביטוח, וגופים מוסדיים). במגזר הביטוח, למשל, עלטה מתמשכת עשויה ליצור פער בין חובת תשלום הפרמיה לבין היכולת לבצע אותה בפועל, ובמקרים נקודתיים הדבר עלול להוביל להתרעות, להשעיה זמנית או לסיכון של הפסקת כיסוי, בעיקר כאשר הפוליסה מצויה ממילא בסמוך לסוף תקופת הגרייס. עם זאת, מאחר שמנגנוני "גרייס" נמשכים בדרך כלל שבועות ולא ימים, השפעה זו צפויה להיות מוגבלת בתרחיש עלטה של ימים ספורים, ולהתעצם בעיקר אם השיבוש מתארך. במצבים אלה עשויה להידרש מדיניות רגולטורית או הנחיה מערכתית לשימור רציפות הכיסוי.

במקביל, בשלבים מוקדמים יחסית של שיבוש בקישוריות ובמסחר עלולים להיווצר קשיים בקביעת שווי עדכני ואמין לנכסים פיננסיים ולהבטיח רציפות תפעולית של חלק ממנגנוני ההשקעה והחיסכון. כאשר זרימת נתוני שוק אינה רציפה, מתחדד קושי תפעולי בתמחור נכסים ובביצוע פעולות הדורשות ערכי שווי עדכניים (למשל פדיונות), ועלול להיווצר פער בין קיום הנכסים לבין היכולת לממשם בזמן אמת – דווקא כאשר הצורך בנזילות עולה. בנוסף, שיבוש ברציפות המדידה עלול ליצור אי-התאמות בין מועד בקשת הפעולה לבין מועד קביעת השווי בפועל, באופן שמעלה שאלות של הוגנות בין עמיתים ושל שיוך תשואות. בתרחישים כאלה עלולה להתפתח גם דינמיקה התנהגותית של "מרוץ לנזילות", שבה מי שמצליח לפעול דרך ערוצים חלופיים מקדים אחרים, ומחריף את הלחץ על המערכת.

היבט ייחודי נוסף במגזר הביטוח הוא התלות במבטחי משנה בינלאומיים כמנגנון לפיזור סיכונים. בתנאי שיבוש קישוריות, עלולה להיווצר מגבלה בתיאום ובהעברת מידע מול גורמים אלה, באופן שמקשה על הפעלת מנגנוני שיתוף-סיכון בזמן אמת ועלול לעכב טיפול בתביעות והעברות. המשמעות המערכתית אינה "קריסה מיידית", אלא אפשרות לריכוז זמני של סיכון ולחצים תזרימיים מקומיים – במיוחד אצל שחקנים קטנים יותר – כאשר ההשפעה מתעצמת ככל שהשיבוש מתמשך.

בנקודת 96 שעות, פגיעה נרחבת בתשלומים יוצרת אפקט דומינו: קמעונאות מתקשה למכור, ספקים מתקשים לספק, ושירותים בסיסיים – דלק, מזון, מים, תרופות – סובלים מהאטה עד כדי עצירה.

כאשר מגבלות תחבורה מצטרפות לכך, נוצרת חסימה כפולה: כסף לא זורם וגם סחורה לא זורמת.

חשיבותו של מזומן כאמצעי תשלום שאינו תלוי בקישוריות דיגיטלית עולה, אך דווקא היכולת להנגיש מזומן לציבור מצטמצמת בתנאי עלטה. במקביל, מתחדד הפער בין כסף פיזי "ביד" לבין נכסים פיננסיים הנחשבים נזילים בשגרה (פיקדונות, יתרות חשבון, קרנות כספיות). בתנאי קיצון, ההנחה ש"שווה-מזומן" מתפקד כמזומן עלולה להישבר משום שהנזילות תלויה במערכות תשלום, סליקה ותקשורת. גם הנגשת מזומן עצמו נשענת על שרשרת

תפעולית פגיעה. כספומטים דורשים חשמל וקישוריות, סניפים דורשים אבטחה וכוח אדם, ושינוע מזומנים דורש תנועה בטוחה ותיאום. מכאן נגזר עיקרון ניהול-סיכונים חשוב: מזומן יכול למתן שיבוש נקודתי, אך הוא אינו פתרון מערכתי לעלטה מתמשכת.

ניתן להניח כי בשלב זה, ואף קודם לכן, מפלס החדרה, הפאניקה והאלימות בציבור הולך וגואה, ויש לצפות לעלייה במקרי הגניבה והפרת הסדר הציבורי.

בנקודת 120 שעות (חמישה ימים), השרידות העסקית והיציבות החברתית מתערערות. עסקים קטנים – ובכללם עסקים חיוניים (למשל, מרכולים) עלולים להיקלע למחנק תזרימי, תשלומי שכר וספקים נדחים, והלחץ לספק שירות מינימלי גובר. במקביל מתפתחת נטייה להתנהגות פיננסית מגוננת – שמירה על מזומנים, דחיית תשלומים, צמצום פעילות – שיכולה להעמיק את השיבוש. ברמה המערכתית, זהו שלב שבו איכות המסר לציבור תלויה במערכות תקשורת. כאשר התקשורת חלקית וחסרה, קשה להסביר מה עובד, היכן ניתן למשוך, ומהו היקף השירות המינימלי. בהיעדר בהירות, הלחץ מתרכז בנקודות מעטות, יוצר עומסים, והעומסים עצמם מגדילים את הסיכון לתקלות נוספות.

לאחר 144 שעות (מקץ מספר ימים), התלות במערכות תקשורת הופכת חריפה במיוחד. המערכת הפיננסית מתקשה לנהל אימותים, בקרות, מניעת הונאות, ניטור חריגים ותפעול מרחוק. כאשר ערוצי תקשורת אינם אמינים, ניתן להניח שהמערכת תעבור לפרוטוקולים שמרניים יותר, תצמצם שירותים, או תגביל עסקאות.

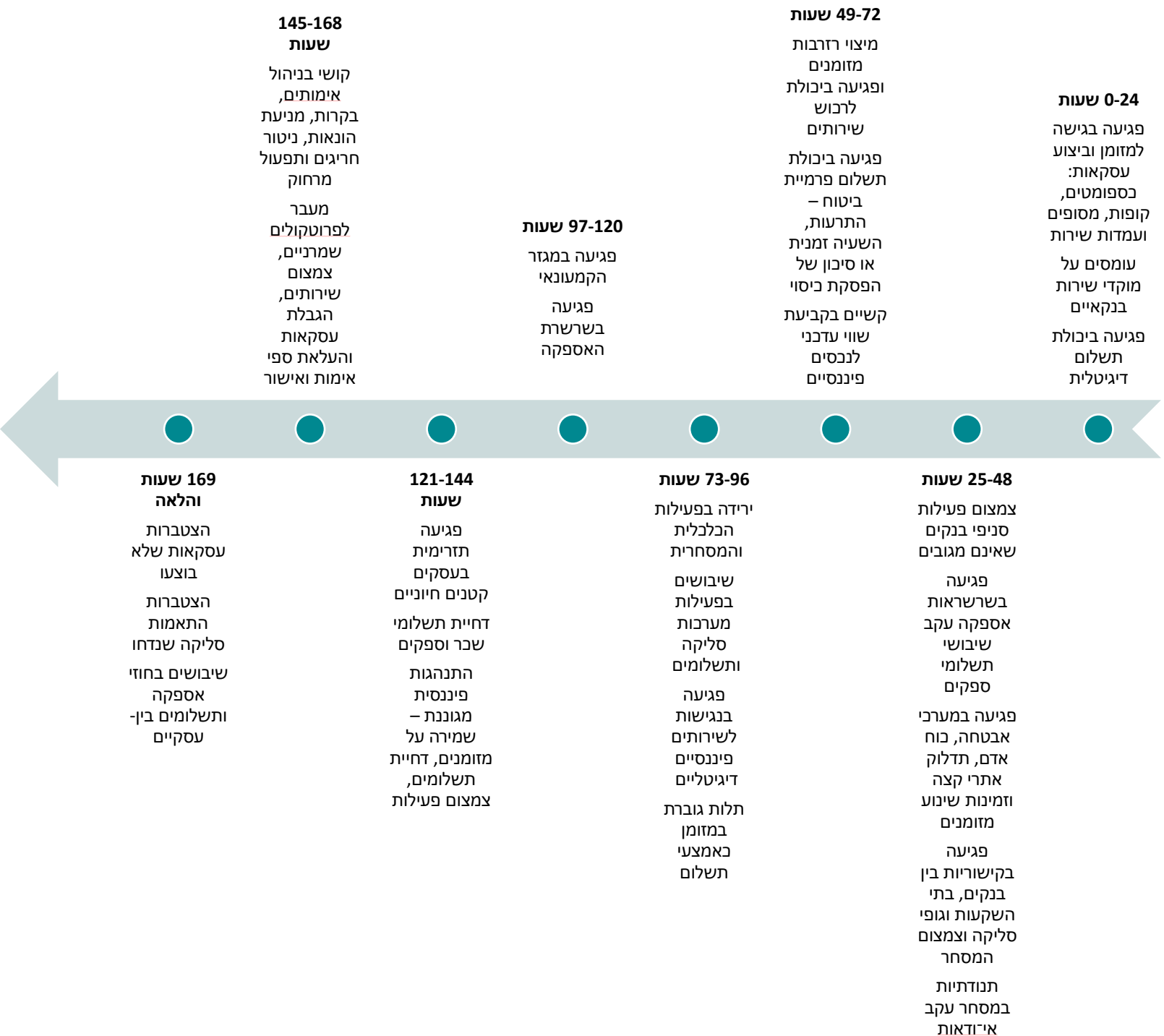
אין לראות בחלון 144 שעות "סף פיזיקלי" חד שבו המערכת עוברת ממצב אחד לאחר, אלא נקודת ציון אנליטית שמייצגת מעבר טיפוס – לאחר מספר ימים של שיבוש מתמשך. כאמור, כבר בשלבים מוקדמים יותר, פגיעה בחשמל ובקישוריות משבשת נגישות בקצה (כספומטים, מסופים, קופות ויישומי תשלום). אולם כאשר אי-יציבות נמשכת לאורך ימים, מתווספים תהליכים ומצטברים כשלים שמעלים את הסיכון התפעולי והאבטחתי של מערכת התשלומים ומאלצים אותה לעבור בהדרגה למצב של "שימור שליטה". בפרט, מתרבים מצבי כשל חלקי (timeouts, ניסיונות חוזרים, תורים שנצברים, עסקאות כפולות או חסרות), אשר מקשים להבחין בזמן אמת בין תקלה לגיטימית לבין פעילות זדונית; מנגנוני אימות, ניטור חריגים, ומניעת הונאה נשענים על זרימת נתונים רציפה וסנכרון בין מערכות, וכאשר ערוצי התקשורת אינם אמינים לאורך זמן, היכולת להפעיל בקרות עקביות נשחקת. במקביל, עומסים חריגים בערוצים שנותרו פעילים – מוקדים, סניפים בודדים ונקודות שירות ספורות – מגבירים את הסיכון לשגיאות ולהונאות. לכן, במצב עלטה מתמשך, סביר שהמערכת תאמץ פרוטוקולים שמרניים יותר: צמצום שירותים, הגבלת סוגי עסקאות, או העלאת ספי אימות ואישור, במטרה להפחית סיכון תפעולי ולשמר אמון – גם אם המשמעות היא ירידה נוספת בנגישות לציבור ולעסקים.

בנקודת 168 שעות, שבוע של שיבושים במערכת הפיננסית מייצר "חוב תפעולי" גם לאחר חזרת חשמל. הצטברות עסקאות שלא בוצעו, התאמות סליקה שנדחו, תורים לשירות, ושיבושים בחוזי אספקה ותשלומים בין-עסקיים.

שיבוש מתמשך בתשלומים בין-בנקאיים ובמערכות סליקה ישפיע על שוק המק"מ והאג"ח הקצרות, ועל עלויות מימון קצרות-טווח. במצבים כאלה גובר תפקידו של הבנק המרכזי כמייצב נזילות וכעוגן אמון – באמצעות הרחבת חלונות אשראי, דחיית מועדי סליקה, ומסרים ברורים לציבור ולשוק בדבר רציפות תפקודית של מערכות הליבה. כלומר, העלטה אינה רק אירוע תפעולי-טכנולוגי אלא גם תרחיש בעל פוטנציאל השפעה מאקרו-כלכלי, בעיקר אם היא נמשכת מספר ימים ומעלה.

ההתאוששות תהיה ממושכת; היא תדרוש החזרת תקשורת יציבה, בדיקות אבטחה, סנכרון מערכות, אימות נתונים, וטיפול בחריגים שנוצרו בתקופת אי-הוודאות. לכן, חוסן של מערכות בנקאות ופיננסיים בשעת עלטה תלוי לא רק בכך שמרכזי הנתונים ממשיכים לעבוד, אלא ביכולת להחזיק שירות מינימלי "בשטח" ו"בקצה" תחת תקשורת מוגבלת, ובקיום מנגנוני fallback מבוקרים שמאפשרים חילות ותשלומים בלי ליצור טעויות מערכתיות, או לפתוח פתח להונאות. בהקשר זה, עצם העובדה שמערכות התשלומים בישראל מוסדרות ומפוקחות במטרה להבטיח יציבות, מחדדת את השאלה שעל הרגולטור לשאול מבעוד מועד: איזו רמת שירות מינימלית ניתן להבטיח באופן בטוח, מתואם ושקוף לציבור?, וכן מהם המנגנונים שיאפשרו לשמור על רמה זו לאור ימי עלטה.

תרשים 9: השלכות עלטה רחבת היקף על תשתיות ומערכות בנקאיות ופיננסיות



חלק שלישי: השפעות בין-מגזריות

פרק 11: ממשקים בין מערכות ותשתיות חיוניות

כאשר אנו בוחנים עלטה כאירוע רב-מערכתי, רב-תשתיתי, עלינו להניח שהמשק מתפקד כרשת של מערכות המקיימות יחסי גומלין ותלות הדדית. במילים אחרות, עלינו להגדיר את המשק כמערכת של מערכות (a system of systems)^{60,59}. גישה זו אינה זרה גם לעיסוק בתשתיות אנרגיה, רשתות חשמל, והמערכות החיוניות השונות התלויות בהן^{63,62,61}.

בתוך כך, עלינו להבחין בכך שמפל הסיכונים (cascading risk) אינו "מציף" את כל המערכות באותו האופן, ובאותה מהירות, וכן, עלינו להבחין בכך שמערכות שונות – סקטורים שונים – מגיבים באופן שונה לתרחישי עלטה שונים, במקומות שונים, ולאורך זמן.

מערכות אחדות עלולות להיפגע ולהמשיך לפעול במתכונת מצומצמת מבלי להשית עומסים משמעותיים על מערכות אחרות, ואילו מערכות מסוימות – תקשורת ותמסורת נתונים למשל – משפיעות באופן מיידי על תפקודן של כל המערכות האחרות. תשתית ורשת החשמל היא מערכת כזו בעצמה – ומכאן העיסוק בעלטה.

במונחי ניהול סיכונים, אלה הן מערכות "מכפילות סיכון": הן אינן רק נפגעות מן האירוע, אלא מעצבות את דינמיקת ההסלמה וההתאוששות של כלל המשק. כאמור, תקשורת היא גורם מכפיל סיכון מובהק משום שהיא תנאי לפיקוד ושליטה, תיאום, ומידע – גם בליבת הפעילות של תשתיות ומערכות שונות, וגם בין מערכות ובין גופי התיאום וניהול מצבי חירום, ובין גופים אלו והציבור הרחב.

תשתיות ומערכות מים הם גורם מכפיל סיכון משום שאלו מהוות תנאי יסוד לבריאות הציבור, לתפקוד מוסדי, ולשרשרת החקלאות-מזון. במקרה של פגיעה מתמשכת שאלת איכות המים ובטיחותם הופכת קריטית כמו שאלת האספקה.

במונחי ניהול סיכונים עלטה – ובמיוחד בימות ניהול המשבר – מלאי החירום של דלק והימצאות גנרטורים בתשתיות חיוניות הוא גורם "משכך" (מעין בלם זעזועים, buffer). על דרך ההופכי, היעדרו מהווה גורם מכפיל סיכון. דלק, וגנרטורים, הם הפתרון התפעולי המיידי והזמין ביותר (לפי שעה) שמאפשרים גיבוי חוצה תשתיות: גנרטורים בקופות החולים ובבתי חולים, אתרי תקשורת, מתקני מים, מרכזי תפעול הכל נשענים על אספקת דלק סדירה; כאשר הדלק או יכולת השינוע שלו נשחקים, המערכות מגובות-הדלק מאבדות כושר תפקוד.

מן ההבחנה כי מפל הסיכונים אינו מתפשט באופן אחיד נגזר עיקרון משלים: זליגת הסיכון מתרחשת בנקודות מחנק, או צווארי-בקבוק בין-מערכתיים (chokepoints). נקודות אלה אינן בהכרח "המתקנים הגדולים ביותר", אלא המקומות בהם מתקיים ממשק הדוק בין מערכות (למשל חשמל, תקשורת ותחבורה; או חשמל, מים ובריאות; או חשמל, תקשורת ושירותי בנקאות).

מבחינה הנדסית-תפעולית, נקודות צוואר-בקבוק הן מקומות בהם הפסקה קצרה יחסית, או ירידה באיכות השירות עלולה להוביל לירידה חדה בתפקוד המערכת כולה, משום שמנגוני היתירות אינם זמינים, או אינם נגישים תפעולית, או תלויים בעצמם במערכות שנפגעו. לכן, בניהול סיכונים עלטה, זיהוי הממשקים בין המערכות וזיהוי צווארי הבקבוק חשוב לא פחות מן השאלה כמה זמן נמשכת ההשבתה (ראו טבלה 1).

ממשק חשמל-תקשורת מהווה דוגמה קלאסית למעגל תלות הדדי (mutual dependency). מצד אחד, כשל באספקת חשמל מחליש בהדרגה את רשתות התקשורת; אתרי סלולר ואתרי שידור עוברים תחילה לגיבוי קצר-טווח (סוללות וגנרטורים), אך אלו נשחקים במהירות כאשר אין יכולת תדלוק רציפה או גישה פיזית לאתרים. מצד שני, כשל בתקשורת מחליש את היכולת לנהל את החשמל עצמו. רשת חשמל מודרנית נשענת על שכבת ניטור,

בקהר ותיאום (SCADA/EMS) ועל מערכות תקשורת – כדי לזהות תקלות, לבדוד מקטעים, להפעיל הגנות באופן מבוקר, ולנהל צוותי תיקון בשטח. כאשר הקישוריות נחלשת, המערכת נעה מתפעול דיגיטלי-מתואם לתפעול חלקי בתנאי מידע חסר. זמן האבחון מתארך, איכות ההחלטות יורדת, והיכולת לבצע שיקום מדורג נפגעת.

ממשק חשמל-מים-בריאות הוא דוגמה נוספת לאופן בו סיכונים זולגים במהירות בין מערכות. מים, כאמור, אינם רק "שירות צרכני", אלא תשתית תברואתית ומוסדית. אובדן חשמל פוגע ביכולת שאיבה והולכת מים לאזורים גבוהים או מרוחקים. לאחר שעות ספורות האיכות והבטיחות עומדות בסיכון. גם כאשר ניתן להזרים מים בהיקף חלקי, היעדר חיטוי וניטור רציפים, ירידה בדיוק תפעולי של מינוני כלור, והקושי לזהות חריגות בזמן אמת – מייצרים סיכון תברואתי שעלול לזלוג למערכת הבריאות הציבורית. יתירה מכך, גם מפעלי תעשייה שחווים קשיים באספקת חשמל, ומערכות הניטור שלהן נפגעות, עלולים לפלוט מזהמים למקורות המים. כל אלו מחייבים תיעודף, במקרים מסוימים הגבלות שימוש, ולעיתים מעבר למודלים של חלוקת מים פיזית – ואלו, בתורם, משיתים עומס על מערכת התחברה, ועל רשויות מקומיות.

ממשק חשמל-תקשורת-פיננסים מחדד נקודה שנוטים להחמיץ: תשלום הוא פעולה תקשורתית כמעט באותה מידה שהוא פעולה פיננסית. מבחינה תפעולית, גם אם מערכות הליבה של הבנקים והמסלקות פועלות במרכזי מחשוב מגובים, נקודת הממשק עם הציבור והעסקים מתבצעת דרך רשתות נתונים: מסופי סליקה, קופות, אפליקציות, כספומטים וקישוריות לרשתות מיתוג ואימות. כאשר קישוריות אינה אמינה, מתרבות תקלות אמצע, שידורים חוזרים, עסקאות לא מאומתות ושגיאות, והמערכת נאלצת להקשיח נהלים כדי לשמור שליטה ולצמצם הונאות ושגיאות נוספות. מכאן נוצר פער מערכתית בין "מערכת קיימת" לבין "מערכת נגישה": הערך הפיננסי יכול להתקיים "על השרתים", אך היכולת להעביר ערך בעולם האמיתי – לקנות דלק, מזון, מים ותרופות – מוגבלת.

ממשק חשמל-תחבורה-בריאות הוא צוואר-בקבוק שמכתיב את קצב ניהול המשבר, ואת התחלואה והתמותה העודפת בזמן המשבר. שירותי בריאות תלויים בזרימה רציפה של אנשים, ציוד ומשאבים: הגעה של צוותים רפואיים, פינוי נפגעים, שינוע תרופות, דם וציוד, ותדלוק שמאפשר להפעיל גנרטורים ואמבולנסים. ללא חשמל, מסילות ונתיבי רכבות מושבתים והציבור עובר לנהיגה ברכבים, כלל שיש דלק, מה שמוביל לגודש בדרכים. כאשר רמזורים מושבתים, מנהרות ומערכות בקרה נסגרות או מוגבלות, ותחנות דלק פועלות בקיבולת נמוכה או לא עקבית – הפגיעה כפולה; זמן ההגעה מתארך וגם "היכולת לתכנן" נפגעת, משום שאין ודאות לגבי צירים פתוחים וזמינות תדלוק. הפגיעה בניידות הצוותים הרפואיים למתקני הרפואה מביאה להחמרת העומס ושחיקת הצוותים הפועלים בחסר גם כך. במונחי ניהול סיכונים, זוהי נקודת חנק רב-מערכתית משום שהיא קובעת את קצב התגובה וההתאוששות של סקטורים רבים בו-זמנית. כאן חשוב להדגיש שבמקרה של מערכת בריאות הציבור, שעות ספורות – ולעיתים דקות – הן משתנה תפעולי קריטי.

ממשק חשמל-מים-מזון ממחיש שתלות אינה מתמצה בייצור חקלאי בשדה. מערכות מזון מודרניות נשענות על מים תקינים עבור תברואה ותפעול לאורך כל שרשרת הערך: ניקוי וחיטוי, תהליכי עיבוד, בטיחות מזון, ותפקוד מתקני קירור ואחסון שנדרשים לעמוד בתקני היגיינה. כאשר אספקת מים הופכת מקוטעת או איכותה מוטלת בספק, מפעלים ומרכזי הפצה מתקשים לשמר תהליכים בטוחים גם אם יש להם מלאי מזון פיזי. לכן, הבעיה נוטה "להחליף צורה": מחסור במזון אינו נובע רק מהיעדר סחורה, אלא מהיעדר תנאים שמאפשרים לייצר, לארוז ולהפיץ מזון באופן תברואתי ומבוקר.

חשוב להדגיש שמדובר בדיון ראשוני שממפה את צווארי הבקבוק, או נקודות המחנק הבולטות ביותר עבור ניהול סיכונים עלטה, אך אינו ממצה את מרחב הממשקים. עבודות המשך יידרשו להרחיב את המיפוי למערכות נוספות ושירותים נוספים, למשל חשמל-דלק, תקשורת-בריאות (רשומות רפואיות), תחבורה-פסולת-בריאות ציבור, וכמובן ממשקי חשמל-ממשל-ניהול ציבורי – ולכמת, היכן שניתן, את ספי הזמן וסף הנזק הנסבל.

בהמשך לכך, הטבלה להלן מציגה מיפוי ראשוני – וכזה המחייב אישושים נוספים – של ההשפעה של מערכת אחת על אחרת בתנאי עלטה הנמשכים 72 שעות (שלוש יממות). אנו מקודדים את עוצמת ההשפעה באופן איכותני: אדום מציין השפעה חריפה (כשל או דגרדציה משמעותית במערכת אחת – על ציר X, צפויים לפגוע במהירות ובאופן מהותי ביכולת התפקוד של האחרת – על ציר Y); כתום מציין השפעה מגבילה (המערכת יכולה להמשיך לתפקד זמן-מה או ברמת שירות מסוימת, אך ההשפעה מצטברת ומגבילה את התפקוד); וצהוב מציין השפעה מתונה (השפעה קיימת אך לרוב עקיפה, איטית יותר, או ניתנת לגישור חלקי באמצעות נהלי חירום).

הערת מסגור: בטבלה זו אנו ממפים השפעה (המשתמעת מיחסי תלות) בין-סקטוריאליית בתוך קבוצת המערכות שהגדרנו. התלות הבסיסית של כולן בחשמל עצמו אינה מופיעה כאן, משום שהיא נתון-רקע של "תרחיש עלטה". ההשפעות, כאמור, מיוחסות לנקודת 72 שעות עלטה.

טבלה 1: מטריצת השפעה בין מערכות ותשתיות לאחר 72 שעות עלטה

| מערכות בלתי-תלויות (משפיעות על-) | | | | | | | מערכות תקשורת | מערכות מים | מערכות חקלאות-מזון | מערכות תחבורה | מערכות בריאות | מערכות ופיננסיים |
|----------------------------------|-------------|--------------------|---------------|---------------|------------------|--------------|---------------|------------|--------------------|---------------|---------------|------------------|
| מערכות תקשורת | מערכות מים | מערכות חקלאות-מזון | מערכות תחבורה | מערכות בריאות | מערכות ופיננסיים | | | | | | | |
| השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | - | - | - | - | - | - |
| השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | - | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מגבילה | - | - | - | - | - |
| השפעה מגבילה | השפעה מתונה | השפעה חריפה | - | השפעה מגבילה | השפעה מגבילה | השפעה מגבילה | השפעה מגבילה | - | - | - | - | - |
| השפעה מגבילה | השפעה מתונה | - | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מגבילה | השפעה מגבילה | - | - | - | - | - |
| השפעה מתונה | - | השפעה חריפה | השפעה מתונה | השפעה מגבילה | השפעה חריפה | השפעה חריפה | השפעה חריפה | - | - | - | - | - |
| - | השפעה מתונה | השפעה מגבילה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה מתונה | השפעה חריפה | השפעה חריפה | - | - | - | - | - |

המטריצה מראה כי יחסי תלות בין-מגזריים אינם סימטריים. מספר מערכות – ובראשן תקשורת, מים ותחבורה – פועלות גם כמכפילי סיכון. פגיעה בהן משליכה באופן משמעותי על התפקוד של סקטורים אחרים. לעומת זאת, מערכת הבריאות מתבלטת כמערכת "סופגת-סיכון": היא מושפעת באופן מיידי וחרף ממספר ממשקים (תקשורת, מים, תחבורה), אך השפעתה על סקטורים אחרים מוגבלת יחסית. תובנה זו חשובה לניהול סיכונים, שכן היא מצביעה על כך שהגנה על "מערכות מכפילות סיכון" (למשל, באמצעות יתירות) עשויה לבלום הסלמה, בעוד שהגנה על "מערכות סופגות סיכון" חיונית לצמצום פגיעה בבריאות הציבור.

פרק 12: טופולוגיה של קשרי גומלין ותלות

לאחר שמזהים את ההשפעות, מכפילי הסיכון ונקודות הממשק, ניתן לתאר את דפוס זליגת הסיכונים הטיפוסי כעץ אירועים (event tree) – רצף סיבתי שמתקדם בצעדים. כשל נקודתי – למשל פגיעה או תקלה במתקן חשמלי שהוא צמתי במובן התפעולי – עלול לנתק אזור רחב לא משום שאין יכולת ייצור, אלא משום שנחסם נתיב הולכה או חלוקה ואין חלופה זמינה בטווח הקצר. מכאן, ההשבתה החשמלית אינה נשארת בגבולות רשת החשמל, היא שוחקת בהדרגה את שרידות התקשורת המקומית. תחילה באמצעות ירידה בקיבולת ובכיסוי, ובהמשך באמצעות מעבר למצב "איים" של שירות ברמות שונות. בשלב זה נפגעת לא רק חוויית השירות לציבור, אלא גם היכולת לנהל אירוע בזמן אמת: תיאום בין-ארגוני, פיקוד ושליטה, וניהול מידע לציבור נעשים חלקיים, מקוטעים ולעיתים סותרים.

כאשר שכבת התקשורת נשחקת, הפגיעה מתורגמת במהירות לשיבוש ביכולת להעביר ערך ולנהל פעילות כלכלית בשטח. ביצוע עסקאות בקצה, תשלום עבור דלק ומזון, הפעלת רכש והפצה, וניהול כוח-אדם ומשמרות – כולם תלויים לא רק בקיום מערכות ליבה אלא בנגישות מעשית אליהן.

במקביל, ולעיתים אף לפני שהשיבוש הפיננסי משתק אזורים שלמים, מתפתחות השפעות מצטברות במערכות אספקת מים וטיפול בשפכים. ללא אספקת אנרגיה רציפה וללא תפעול מתואם, שאיבה וחיטוי נעשים מקוטעים, איכות המים משתנה, ובשפכים עלולה להיווצר הצטברות ואף גלישה מקומית שמייצרת עומס סביבתי ובריאותי. כאשר גם התנועה נפגעת – בשל כשלים ברמזורים, מגבלות תדלוק, ותפקוד מוגבל של תשתיות תחבורה – כלל המערכות מתקשות "להחזיק את עצמן" לוגיסטית: דלק מתקשה להגיע לגנרטורים, חלפים מתקשים להגיע למתקנים, וצוותים מתקשים להגיע לנקודות תפעול. כך, מעגל התלות נסגר ומתחזק, וקצב ההידרדרות מוכתב פחות על ידי "עוצמת הטריגר" הראשוני ויותר על ידי הטופולוגיה של התלות, קיומם של צווארי-בקבוק ללא עקיפה מהירה, וקצב השחיקה של שכבות הגיבוי לאורך ציר הזמן.

בהקשר הישראלי, המשמעות האופרטיבית של דפוס הזליגה היא כפולה. ראשית, ניהול חוסן אינו יכול להישאר אנכי בתוך כל מגזר; הוא מוכרח להיות אופקי בנקודות הממשק – שם נוצרים הפערים המסוכנים ביותר, ושם גם ניתן להשיג את התועלת הגדולה ביותר (במונחי ניהול סיכונים) מהיערכות מתואמת. שנית, יש להבחין בין זליגה הנובעת מן האירוע עצמו לבין זליגה הנובעת מאופן הניהול בזמן אמת: אם תקשורת, תדלוק ותיעדוף שירותים אינם מוגדרים מראש כמשאבים מערכתיים ובעלי קדימות, המשק עלול להיכנס למעגל ההידרדרות שבו כל מגזר "מציל את עצמו" במחיר החלשת האחרים, דווקא ברגע שבו נדרש ניהול משותף של רציפות מינימלית.

חלק רביעי: מניעה, חוסן, וניהול אירועי עלטה

פרק 13: מכאן והלאה

פרק זה אינו מוקד העבודה הנוכחית. הוא מוצג כנדבך מסכם שמתרגם את הממצאים המערכתיים לשפת "מענה" כללית. מאחר שהניתוח כאן הוא ראשוני ובלתי ממצה, ובוודאי משום שפרטי המענה תלויים בטופולוגיה ההנדסית, במבנה הרגולטורי ובנהלי התפעול של כל סקטור ושל כל ממשק בין-סקטוריאלי, נדרשות עבודות המשך ייעודיות: מסד של סדנאות תרחישים רב-מגזריות, ניתוח מקרי מבחן מן העולם ובחינת התאמתם להקשר הישראלי, סימולטורים לתרחישי מפל סיכונים ומכפילי סיכון, והיכן שניתן בניית מודלים שמסייעים להגדיר ספי שירות מינימלי (או מצבי שירות בלתי-נסבלים) ולבחון אותם תחת אילוצים של דלק, תקשורת, כוח-אדם ונגישות, בין היתר. התועלת של מנגנונים אלה אינה תיאורטית כלל ועיקר; הם מייצרים שפה משותפת בין גופים, מאפשרים בדיקת הנחות מראש, ומחזקים את היכולת לקבל החלטות עקביות תחת אי-ודאות ובזמן אמת.

המענה לעלטה צריך להיבנות בשתי שכבות משלימות הנסמכות זו על זו: שכבת מניעה והפחתת הסתברות, ושכבת רציפות תפקודית והתאוששות. בשכבת המניעה והפחתת ההסתברות, ההיגיון המערכתי הוא להתמקד במה שמייצר סיכון בלתי-לינארי – למשל, מתקנים וצמתים תפעוליים ברשת ההולכה והמיתוג, מערכות בקרה ושכבות תקשורת תפעולית, ופרקטיקות ניהול עומסים בשיאים. יתירות, הקטנת נקודות כשל יחיד והגנה פיזית-סייברית על רכיבי שליטה ובקרה אינם בחזקת "עוד פרויקט תשתית"; הם צמצום של מנגנוני החרפה וזליגת סיכונים, משום שהם מפחיתים את ההסתברות שכשל נקודתי יהפוך לניתוק רחב, ואת ההסתברות שיכולת הניהול בזמן אמת תקרוס דווקא כשהיא נדרשת ביותר.

בשכבה השנייה, שכבת הרציפות התפקודית וההתאוששות, המפתח הוא להבטיח שהמשק מסוגל להחזיק רמת שירות מינימלית לאורך שבוע, משום שזהו אופק זמן שבו רבים ממנגנוני הגיבוי הסטנדרטיים חווים שחיקה, והמשבר נוטה לעבור מניהול תקלה לניהול רציפות תפקודית: תדלוק, תחזוקה, כוח-אדם, חלפים, תקשורת, ותיאום בין-ארגוני נעשים הגורמים שמכתיבים האם ניתן להכיל את המשבר או שהוא מתדרדר והולך.

ברמה הלאומית, נדרש מנגנון שמגדיר מראש מהו "שירות מינימלי נסבל" במונחי תפקוד, במונחי נזק, במונחי נפגעים ולא רק במונחי חשמל. השאלה התפעולית אינה רק כמה מגואט יחזרו לרשת ומתי, אלא אילו פונקציות חייבות להישמר: יכולת תיאום חירום, מים בטוחים לשתיה ברמת סף, טיפול רפואי קריטי, תדלוק והפעלת גנרטורים, תשלום ונזילות בסיסית, וצירי תנועה לוגיסטיים מוגנים. כדי שהתשובה לשאלה תהיה יותר מהצהרה ריקה, יש צורך בסטנדרטיזציה לאומית של ספי שירות, ובמנגנון תיעודי שמקבל מעמד מחייב: אילו מתקנים מקבלים קדימות בהחזרת חשמל, אילו מוקדי תקשורת מקבלים קדימות בתדלוק, כיצד מוגדרים "צרכנים חיוניים", ומהם תנאי ההפעלה המינימלית כאשר חלק מן התשתית הדיגיטלית אינו זמין. מנגנון כזה מחייב גם ממשק ניהול-מידע לציבור, לא כנספח תקשורת, אלא כרכיב בקרה שמפחית פאניקה, מונע עומסים על מוקדים ומייצר ציוד מושכל לתיעוד, במיוחד כאשר קישוריות אינה יציבה.

ברמה המערכתית-מגזרית, נדרש ליישם את אותה לוגיקה "על פי שפה משותפת אך עם פרשנות מקצועית ייעודית". לכל סקטור יש ארכיטקטורת גיבוי, נקודות כשל ונהלי חירום שונים, ולכן המנגנון הגנרי צריך להתבטא כהנדסת רציפות תפקודית: מיפוי עומסים חיוניים מול לא חיוניים, תכנון תפעול "degraded mode" שאינו תלוי בהנחות אופטימיות לגבי תקשורת או תחבורה, והגדרה מדידה של ספי זמן – מתי עוברים מהסתגלות לתיעוד, ומתי חייבים להפעיל חלופות (כגון חלוקה פיזית של מים או מזון, תשלום במנגנון חלופי, או מעבר לשיטות עבודה ידניות). בתוך כך, יש חשיבות מיוחדת לתכנון לוגיסטי-תפעולי: מלאי דלק וכימיקלים, הסדרי אספקה בחירום, חלפים קריטיים, והיכולת להפעיל צוותים לאורך ימים. כאן חוזר חסם יסודי שחוצה מערכות: האחריות "נמרחת"

בין בעלים, רגולטור, מפעיל, ורשות חירום; בלי מנגנון שמכריע מי מחזיק, מי מתקצב, ומה הסטנדרט המחייב, החוסן נשאר תלוי רצון טוב ולא הופך ליכולת מערכתית.

בין הרמה הלאומית למגזרית ניצבת הרמה הבין-מגזרית – והיא לב ליבו של יכולת החוסן המשקית. עלטה מתמשכת היא מבחן של ממשקים: חשמל-תקשורת, חשמל-מים, תקשורת-פיננסים, תחבורה-דלק, וכולם יחד סביב בריאות וחירום. לכן נדרש מנגנון קבוע לניהול ממשקים שאינו "מתעורר" רק בעת משבר. מנגנון כזה צריך לכלול שפת נתונים מינימלית משותפת (מה מדווחים, באיזו תדירות, ובאיזו רמת אמינות כאשר התקשורת חלקית), נהלי תיאום לתיעודף הדדי, למשל: תדלוק אתרי תקשורת שמאפשרים תיאום לתיקון רשת החשמל, ותכנון מראש של מסדרונות לוגיסטיים שמגדירים כמשאב מערכת. במילים אחרות, אם תקשורת, מים ודלק-לוגיסטיקה הם "מכפילי סיכון", אזי ניהול החוסן חייב להתייחס אליהם כאל מכפילי-מענה: מוקדי השקעה, תיאום וקדימות תפעולית, משום שהם משנים את הדינמיקה של יתר המערכות, והמשבר בכללותו.

מכאן נגזר גם רכיב מוכר אך לעיתים לא ממומש דיו: תרגול רב-מגזרי אמיתי. לא די בתרגיל של גוף יחיד. תרגיל אפקטיבי צריך לדמות לא רק אובדן חשמל, אלא גם דגרוציה של תקשורת, מגבלות תדלוק, קשיי תנועה, ומגבלות מידע לציבור – כלומר את התנאים שמייצרים אירוע מערכתי ולא אירוע סקטוריאלי. תרגול כזה צריך לכלול רגעי הכרעה: מתי עוברים מתפעול רגיל לתיעודף, מי מוסמך לשנות כללי שירות, כיצד מפעילים ערוצי חירום חלופיים, ומה עושים כאשר תשתית דיגיטלית אינה זמינה. תרגול הוא גם כלי מדידה: הוא חושף האם מנגנוני ניהול משבר שנראים "קיימים" על הנייר אכן בני-הפעלה תחת אילוצים של זמן, כוח-אדם ותחבורה.

לבסוף, לצד המענה ההנדסי-מוסדי, נדרש רכיב חוסן קהילתי-אזרחי שאינו תחליף למדינה אלא משלים אותה. במציאות שבה תשתיות איתנות נשחקות לאורך ימים, חלק מן היכולת לבלום הידרדרות תלוי בהתנהגות הציבור ובקיבולת המקומית לשמר תפקוד בסיסי. חוסן קהילתי בהקשר זה אינו סיסמה; הוא מערך תפעולי מקומי. נקודות מידע ושירות פיזיות כאשר שירותים דיגיטליים מוגבלים, מנגנוני סיוע לאוכלוסיות תלויות-חשמל (תרופות בקירור, ציוד רפואי ביתי), גיבוי קהילתי למים, מזון ולתקשורת בסיסית, וסדרי עדיפויות מקומיים שמקטינים עומס על מוקדי חירום. בכך יש גם היגיון של מניעת סיכון משני: ככל שהקהילה מסוגלת לשמור על שגרה מינימלית ולהבין את כללי התיעודף, כך פוחתים עומסים מיותרים על תקשורת, תחבורה, בריאות ומנגנוני חלוקה.

מגמות מבניות במשק האנרגיה והמשק הדיגיטלי מחייבות להסתכל קדימה, לא רק "לסגור פינות". ביזור ייצור ואגירה, מיקרו-גרידים והיתכנות של islanding סביב מתקנים חיוניים יכולים, בתנאים הנכונים, להגדיל שרידות ולהפחית תלות בנקודות כשל אחת.^{64,65,66} עם זאת, ביזור ללא תכנון תפעולי, תקינה, ויכולות בקרה עמידות עלול ליצור רגישויות חדשות ליציבות ולניהול עומסים, ולכן הוא חייב להיות משולב במסגרת חוסן ולא רק במסגרת יעדים אנרגטיים. בתוך כך, חוות שרתים וצרכני-על דיגיטליים מציבים אתגר כפול: הם מעמיסים על שיאים ועל חלוקה מקומית, אך הם גם יכולים להיות "עוגני שרידות וחוסן" אם הם מחזיקים יכולת ייצור ואגירה ומשתלבים בתכניות חירום מוסדרות. תחבורה חשמלית, באופן דומה, מגדילה תלות בתשתית טעינה ובחשמל, אך בעתיד עשויה להפוך למשאב גיבוי מבוצר רק אם V2H/V2G מוסדרים, בטיחותיים ומנוהלים במסגרת מדיניות רציפות תפקודית – אחרת אלו מהווים אילוץ תפעולי בשעת עלטה.

עם זאת, הניסיון מלמד כי עצם קיומם של מקורות ייצור מבוצרים אינו מביטיח תפקוד בפועל בעת חירום. בתרחישים שנבחנו בשנים האחרונות – ובכלל זה אירועי חירום שבהם נפגעה זמינות כוח אדם, תקשורת או גישה למתקנים – דווח כי מתקנים סולאריים במתקני מים וקולחים לא תורגמו בהכרח לשירות מים בפועל, בין היתר בשל היעדר יכולת ניתוב והפעלה עצמאית של מערכות שאיבה בתנאי חירום. מכאן שהתרומה לחוסן תלויה לא רק בהתקנת היכולת, אלא בהטמעה תפעולית-ארגונית. יש לוודא הגדרת מצבי פעולה ייעודיים לשעת חירום, יכולת הפעלה "מבודדת" (islanding) של עומסים קריטיים, נהלי מעבר והחזרה, ותיאום עם שכבות בקרה ותחזוקה. יכולות אלה

עשויות להיות בעלות חשיבות מיוחדת בתרחישים ממושכים, ובפרט מעבר למספר ימים, כאשר זמינות הדלק לגנרטורים נעשית גורם מגביל.

במבט מסכם, פרק זה מציע כללי אצבע ומנגנונים גנריים המתאימים "לכל עת" משום שהם מתמקדים בעקרונות המשותפים לכל מערכת: הגדרה מראש של שירות מינימלי, תיעודף מחייב, גיבוי ארוך-טווח בר-ביצוע, ניהול ממשקים, תרגול רב-מגזרי, וממשק קהילתי שמקטין סיכון משני. יחד עם זאת, הכרה באופיים הגנרי היא גם גבול האחריות של פרק זה: כדי להפוך את העקרונות הללו לתוכנית עבודה, נדרשות עבודות המשך שמותאמות לכל סקטור ולכל ממשק בין-סקטוריאלי, לרבות מיפוי צמתים קריטיים ספציפיים, קביעת סטנדרטים דיפרנציאליים של גיבוי וזמינות, בניית תרחישי ייחוס מפורטים, ופיתוח יכולות מדידה, סימולציה ותרגול שמאפשרות להחליף הנחות לא-בדוקות ביכולת מוכחת.

כשהאורות יכבו, תיבחן המדינה – וניבחן כולנו – לא לפי ההצהרות ששמענו על "סבירות נמוכה", אלא לפי ההיערכות שנערכנו לשעת השין מבעוד מועד; השינויים שערכנו בטופולוגית התלות, יתירות שפיתחנו, קצב השחיקה של גיבויים שהארכנו; תרגולים, פרוטוקולי תיעודף, מנגנוני שימור אמון, שפה משותפת שהטמענו, וניהול סיכונים צופה פני עתיד.

מקורות

- risks: Understanding the 2021 winter blackout in Texas. *Energy Research & Social Science*, 77, 102106. https://www.nerc.com/globalassets/our-work/reports/event-reports/february_2021_cold_weather_report.pdf. https://www.nerc.com/globalassets/our-work/reports/event-reports/february_2021_cold_weather_report.pdf
- California Public Utilities Commission. (n.d.). *Public Safety Power Shutoff (PSPS)*. <https://www.cpuc.ca.gov/psps/>
- Haes Alhelou, H., Hamedani-Golshan, M. E., Njenda, T. C., & Siano, P. (2019). A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges. *Energies*, 12(4), 682.
- de Ruijter, A., & Guldenmund, F. (2016). The bowtie method: A review. *Safety science*, 88, 211-218.
- Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2012). Dynamic risk analysis using bow-tie approach. *Reliability Engineering & System Safety*, 104, 36-44.
- McLeod, R. W., & Bowie, P. (2018). Bowtie Analysis as a prospective risk assessment technique in primary healthcare. *Policy and Practice in Health and Safety*, 16(2), 177-193.
- Moazeni, S., Powell, W. B., & Hajimiragha, A. H. (2014). Mean-conditional value-at-risk optimal energy storage operation in the presence of transaction costs. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(3), 1222-1232.
- Zhang, Y., Shen, S., & Mathieu, J. L. (2016). Distributionally robust chance-constrained optimal power flow with uncertain renewables and uncertain reserves provided by loads. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2), 1378-1388.
- Schechter, A., Reshef, B., & Tzachor, A. (2025). *Energy infrastructure for artificial intelligence: Policy paper*. Reichman University. <https://www.runi.ac.il/media/ypiknmxz/לבינה-מלאכותית-נייר-מדיניות.pdf>
- Stone Jr, B., Gronlund, C. J., Mallen, E., Hondula, D., O'Neill, M. S., Rajput, M., ... & Georgescu, M. (2023). How blackouts during heat waves amplify mortality and morbidity risk. *Environmental Science & Technology*, 57(22), 8245-8255.
- פרופ' דפנה קנטי, ד"ר ברמית רפפורט, ד"ר אלדד שמש, ד"ר קרן לוי גנני-סניידר. (2024). לא רק טילים: האיום שמאיים להחשיך את ישראל. מעריב.
- Schäfer, B., Witthaut, D., Timme, M., & Latora, V. (2018). Dynamically induced cascading failures in power grids. *Nature communications*, 9(1), 1975.
- מירב ארלוזורוב. (2025). רשות החירום הלאומית מזהירה מעלטה כללית: אין גיבוי לרשתות הסלולר, הסליקה, הרמזורים ותחנות הדלק. TheMarker. <https://www.themarker.com/dynamo/2025-06-14/ty-article/.premium/00000197-6e0b-d3ff-a7bf-6e9bac560000>
- Haes Alhelou, H., Hamedani-Golshan, M. E., Njenda, T. C., & Siano, P. (2019). A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges. *Energies*, 12(4), 682.
- Sullivan, J. E., & Kamensky, D. (2017). How cyber-attacks in Ukraine show the vulnerability of the US power grid. *The Electricity Journal*, 30(3), 30-35.
- Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. (2016). IR-ALERT-H-16-056-01: Cyber attack against Ukrainian critical infrastructure. <https://www.cisa.gov/news-events/ics-alerts/ir-alert-h-16-056-01>
- Vinson & Elkins LLP. (2016). *Analysis of the cyber attack on the Ukrainian power grid*. Vinson & Elkins. <https://www.vnf.com/webfiles/cyberattackukraine.pdf>
- Goiana-da-Silva, F., Madureira-Fonseca, D., Tude Graça, D., Moitinho De Almeida, M., Cabral Pinho, M., Sá, J., ... & Darzi, A. (2025). When the lights went out: impacts of the April 2025 Iberian blackout on the Portuguese National Health Service sovereignty—a reflection on national defence, health sovereignty, risk, and infrastructural dependency. *Frontiers in Public Health*, 13, 1630933.
- ENTSO-E. (2025). *Blackout in the Iberian Peninsula on 28 April 2025*. European Network of Transmission System Operators for Electricity. <https://www.entsoe.eu/publications/blackout/28-april-2025-iberian-blackout/>
- Feng, K., Ouyang, M., & Lin, N. (2022). Tropical cyclone-blackout-heatwave compound hazard resilience in a changing climate. *Nature communications*, 13(1), 4421.
- Busby, J. W., Baker, K., Bazilian, M. D., Gilbert, A. Q., Grubert, E., Rai, V., ... & Webber, M. E. (2021). Cascading

Mani, L., Tzachor, A., & Cole, P. (2024). 12. Global Catastrophic Risk From Low Magnitude Volcanic Eruptions. *An Anthology of Global Risk*, 361.

Ghafory-Ashtiany, M., & Arghavani, M. (2022). Physical performance of power grids against earthquakes: from framework to implementation. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 39, 100550.

Akdag, O. (2024). Strengthening distribution systems after earthquakes with a new analytical model. *Electric Power Systems Research*, 232, 110337.

Kwon, Y., & Song, J. (2025). Network Causality-Based Decision Support for Power Grid Resilience Considering Braess's Paradox. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 11(3), 04025048.

Sun, C. C., Hahn, A., & Liu, C. C. (2018). Cyber security of a power grid: State-of-the-art. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 99, 45-56.

Tzachor, A. (2025). Diversifying global communications beyond submarine cables. *Nature Electronics*, 8(8), 635-638.

ד"ר איתי גל. (2025). שאלה של חיים ומוות: מה יקרה אם איראן תקריס את רשת הסלולר בישראל?. מעריב. <https://www.maariv.co.il/economy/tech/article-1206300>

Tzachor, A. (2025). Diversifying global communications beyond submarine cables. *Nature Electronics*, 8(8), 635-638.

רשות החשמל. (2025). דוח משק החשמל 2025-2024. ומשרד האנרגיה והתשתיות. https://www.gov.il/BlobFolder/generalpage/dochmeshek/he/Files_netunei_hasmal_AnnualReport_2024-2025_nnn.pdf

Richards, C. E., Tzachor, A., Avin, S., & Fenner, R. (2023). Rewards, risks and responsible deployment of artificial intelligence in water systems. *Nature Water*, 1(5), 422-432.

דוח ביקורת בנושא מתקני התפלה (דוח שנתי 75א, חלק ב'). משרד מבקר המדינה ונציב תלונות הציבור. <https://library.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Documents/2024/2024.11-75A-PartB/2024.11-75A-PartB-301-Hatpala.pdf>

Wang, Y., Ma, F., Wang, H., Tzachor, A., Jiang, M., Fang, K., ... & Lutter, S. (2025). Doubling of the global freshwater footprint of material production over two decades. *Nature Sustainability*, 1-13.

Ivanov, D. (2025). Blackout and supply chains: Cross-structural ripple effect, performance, resilience and viability impact analysis. *Annals of Operations Research*, 348(3), 1127-1143.

Blouin, S., Herwig, A., Rivers, M., Tieman, R. J., & Denkenberger, D. C. (2024). Assessing the impact of catastrophic electricity loss on the food supply chain. *International Journal of Disaster Risk Science*, 15(4), 481-493.

Tzachor, A., & Richards, C. E. (2021). Future foods for urban food production. In *The Palgrave encyclopedia of urban and regional futures* (pp. 1-8). Cham: Springer International Publishing.

Jones, A., Bridle, S., Denby, K., Bhunnoo, R., Morton, D., Stanbrough, L., ... & Whiteside, K. (2023). Scoping potential routes to UK civil unrest via the food system: results of a structured expert elicitation. *Sustainability*, 15(20), 14783.

Tzachor, A., Richards, C. E., & Jeen, S. (2022). Transforming agrifood production systems and supply chains with digital twins. *npj Science of Food*, 6(1), 47.

Heck, S., Campos, H., Barker, I., Okello, J. J., Baral, A., Boy, E., ... & Birol, E. (2020). Resilient agri-food systems for nutrition amidst COVID-19: evidence and lessons from food-based approaches to overcome micronutrient deficiency and rebuild livelihoods after crises. *Food Security*, 12(4), 823-830.

Yilmaz, H., & Yilmaz, A. (2025). Hidden hunger in the age of abundance: the nutritional pitfalls of modern staple crops. *Food Science & Nutrition*, 13(2), e4610.

Pinstrup-Andersen, P. (2009). Food security: definition and measurement. *Food security*, 1(1), 5-7.

Chovančíková, N., & Hoterová, K. (2021). Scenario Analysis of the Impact of a Power Outage to the Transport Infrastructure in The Selected Area. *Transportation Research Procedia*, 55, 1423-1430.

משרד התחבורה, הרשות הארצית לתחבורה בדרכים. (2025). הודעת דוברות: המהפכה הירוקה בתחבורה הציבורית מתקדמת בקצב מואץ: 2000 אוטובוסים חשמליים כבר נוסעים בבנייני הארץ. https://www.gov.il/he/pages/pt_news_1201

הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה. (2024). הודעה לתקשורת: כלי רכב מנועיים בישראל בשנת 2024. https://www.cbs.gov.il/he/mediarelease/DocLib/2025/130/27_25_130b.pdf

משרד האנרגיה והתשתיות. (2023). הודעת דוברות: תחזית של משרד האנרגיה והתשתיות מציגה: בשנת 2030 צפויה התחבורה החשמלית בישראל לצרוך כ-6% מהביקוש לחשמל במשק וכ-15% מהביקוש בשנת 2050.

Liu, C., Chau, K. T., Wu, D., & Gao, S. (2013). Opportunities and challenges of vehicle-to-home, vehicle-to-vehicle, and vehicle-to-grid technologies. *Proceedings of the IEEE*, 101(11), 2409-2427.

Yilmaz, M., & Krein, P. T. (2012, September). Review of benefits and challenges of vehicle-to-grid technology. In *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)* (pp. 3082-3089). IEEE.

Qiu, Y., Deng, N., Wang, B., Shen, X., Wang, Z., Hultman, N., ... & Wang, Y. D. (2024). Power supply disruptions deter electric vehicle adoption in cities in China. *Nature Communications*, 15(1), 6041.

Tan, K. M., Ramachandramurthy, V. K., & Yong, J. Y. (2016). Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization

techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 720-732.

⁵⁰ עידו אפרתי. (2024). פיניו או גנרטור צמוד: מה יקרה ל-5,000 מונשמי-בית במקרה של מלחמה בצפון?. הארץ.

⁵¹ וקנין, ג'. (2025, 9 במרץ). דיון בכנסת: מיליון וחצי אזרחים מטפלים בקרובי משפחה ללא תמורה. שוויים.

⁵² Brehovská, L., Nešporová, V., & Řehák, D. (2017). Approach to assessing the preparedness of hospitals to power outages. *53* ממשלת ישראל. (2012). תקנות החשמל (מיתקני חשמל באתרים רפואיים במתח שאינו עולה על מתח נמוך), תשע"ב-2012. https://www.nevo.co.il/law_html/law01/500_718.htm/

⁵⁴ משרד הבריאות. (2014). נוהל E-01 נוהל מתקני חשמל באתרים רפואיים. https://www.gov.il/BlobFolder/policy/pln-e01-new/he/files_circulars_pln_Pln_E01-new.pdf

⁵⁵ Gurieff, N., Green, D., Koskinen, I., Lipson, M., Baldry, M., Maddocks, A., ... & Doroodchi, E. (2020). Healthy power: Reimagining hospitals as sustainable energy hubs. *Sustainability*, 12(20), 8554.

⁵⁶ Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Poetzsch, M., & Riehm, U. (2011). What happens during a blackout. *Consequences of a prolonged and wide-ranging power outage, Office of Technology Assessment at the German Bundestag*.

⁵⁷ Matthewman, S., & Byrd, H. (2014). Blackouts: a sociology of electrical power failure. *Social Space*, 7(1), 1-25.

⁵⁸ המפקח על הבנקים. (2021). נוהל 355: ניהול בנקאי תקין וניהול עסקית. <https://boi.org.il/media/moklktcz/355.pdf>

⁵⁹ Eusgeld, I., Nan, C., & Dietz, S. (2011). "System-of-systems" approach for interdependent critical

infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*, 96(6), 679-686.

⁶⁰ Jamshidi, M. (2017). Introduction to system of systems. In *Systems of systems engineering* (pp. 1-36). CRC Press.

⁶¹ Pruyt, E., & Thissen, W. (2007, April). Transition of the European electricity system and system of systems concepts. In *2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering* (pp. 1-6). IEEE.

⁶² Marvasti, A. K., Fu, Y., DorMohammadi, S., & Rais-Rohani, M. (2014). Optimal operation of active distribution grids: A system of systems framework. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(3), 1228-1237.

⁶³ Uslar, M., Rohjans, S., Neureiter, C., Pröbstl André, F., Velasquez, J., Steinbrink, C., ... & Strasser, T. I. (2019). Applying the smart grid architecture model for designing and validating system-of-systems in the power and energy domain: A European perspective. *Energies*, 12(2), 258.

⁶⁴ Colson, C. M., Nehrir, M. H., & Gunderson, R. W. (2011, August). Distributed multi-agent microgrids: a decentralized approach to resilient power system self-healing. In *2011 4th international symposium on resilient control systems* (pp. 83-88). IEEE.

⁶⁵ Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziargyriou, N. D. (2016). Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(6), 2913-2922.

⁶⁶ Shaukat, N., Islam, M. R., Rahman, M. M., Khan, B., Ullah, B., Ali, S. M., & Fekih, A. (2023). Decentralized, democratized, and decarbonized future electric power distribution grids: a survey on the paradigm shift from the conventional power system to micro grid structures. *IEEE Access*, 11, 60957-60987.