



קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה
אוניברסיטת חיפה



מרכז המחקר
המכללה לביטחון לאומי

תת-קרקע

נקודת מבט גאואסטרטגית

אנטון ברקובסקי וארנון סופר



קתדרת חייקין לגאואסטרוטגיה
אוניברסיטת חיפה



מרכז המחקר
המכללה לביטחון לאומי

תת-קרקע: נקודת מבט גאואסטרוטגית

אנטון ברקובסקי וארנון סופר

נובמבר 2014

המרכז למחקר של המכללה לביטחון לאומי, צה"ל

מרכז המחקר של המכללה לביטחון לאומי שואף לעסוק בחקר תופעות מתהוות בהקשרי הביטחון הלאומי, מפתח ידע אקטואלי להוראה במכללה ומשתתף בניסיון לנסח תפיסת ביטחון רשמית ועדכנית למדינת ישראל, בהובלת המועצה לביטחון לאומי. חצר המכללות מבקשת לשמש אכסניה ובית מדרש, אשר בו יתפתח ידע חדש ורלוונטי עבור גופי הביטחון הלאומי, מכללות צה"ל וגופי מחקר עמיתים, בארץ ובחו"ל, ובהשתתפותם. המרכז שם לו למטרה לממש את הייעוד המחקרי של המכללה לביטחון לאומי, תוך ניצול יתרונו היחסי בתחום הביטחון הלאומי כמקום מפגש בין-ארגוני ולאור ניסיונם המעשי של התלמידים, הבא לידי ביטוי במחקה.

קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה

הקתדרה עוסקת בנושאי הביטחון הלאומי שלהם ביטוי מרחבי, ובהם משאבים טבעיים ותפוצתם, פריסת האוכלוסייה, התשתית הפיזית והמרכיבים הסביבתיים. הקתדרה מפרסמת ניירות עמדה, נותנת ייעוץ למקבלי החלטות בכירים, יוזמת מחקרים, ימי עיון וכנסים, מוציאה ספרים ועבודות מדעיות ומסייעת לתלמידי מחקר בתחומים הנזכרים לעיל. כמו כן עוסקת הקתדרה בהפצת הנושא בבתי הספר התיכוניים ובמוסדות אקדמיה.

ראובן חייקין ז"ל (1918–2004)

ראובן חייקין נולד בתל אביב, היה שותף בכיר במשרד רואי החשבון סומך-חייקין, גילה עניין רב בגאוגרפיה ובגאופוליטיקה וסייע רבות לתחומים אלה באוניברסיטת חיפה.

יהי זכרו ברוך!

ראש הקתדרה: **ארנון סופר**

עריכה גרפית והבאה לדפוס: **נוגה יוסלביץ**

הודפס בישראל בשנת 2014

© כל הזכויות לקתדרת חייקין לגאואסטרטגיה באוניברסיטת חיפה.

ISBN 965-7437-45-2

הדפסה: א.א.א. הדפסות בע"מ

<http://ch-strategy.hevra.haifa.ac.il>

תוכן העניינים

5	הקדמה
7	מבוא
10	פרק א. הכרחיות השימוש בתת-קרקע בישראל והדרך לכך
14	פרק ב. פיתוח התת-קרקע: רקע היסטורי
22	פרק ג. התת-קרקע: סיווג ומיון
29	פרק ד. התת-קרקע בישראל
33	פרק ה. המינהור אצל שכנינו
33	המנהרות בעזה - מקרה מבחן לשימוש אסטרטגי בתת-קרקע
37	מנהרות עוינות - לקחים וביקורת אחרי מבצע "צוק איתן"
40	סיכום
41	מקורות

הקדמה

הצורך של ישראל בקרקע גובר והולך. כבר היום היא מן הצפופות במדינות המערב, ואם נתעלם מהנגב הדרומי התופס 60% משטח המדינה, הרי הצפיפות בישראל הצפונית היא הגבוהה בכל מדינות המערב. המלחמה על כל דונם קרקע מחמירה. זה בא לידי ביטוי במחירי הנדל"ן, במאבק נגד צה"ל ומערכת הביטחון על שטחים שהם מחזיקים, ובתביעות משפטיות על נזקים שגורם או יכול לגרום מיקום של מתקן רגיש זה או אחר (לדוגמה הוויכוח על מכל האמוניה בחיפה, על מיקום מתקן ההנזלה של הגז, על מעבר צינור הגז על כביש יקנעם-חיפה).

אוכלוסיית ישראל תוסיף לגדול בממדי עולם מתפתח, אך החברה הישראלית ממשיכה להתנהל כמדינת עולם מפותח. לכן, ברור ש"מלחמה על הקרקע" היא רק בתחילתה. במציאות שנוצרה, פחות ופחות אנו עדיין יכולים לתמרן, ללחוץ, להזיז מתקנים, אבל מהר מאוד נגיע לקצה גבול התמרון.

בסדרת הפרסומים של קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה בנושאי התשתיות הלאומיות מטרטנו להביא לידיעת מקבלי ההחלטות (האזרחיים ומערכות הביטחון) נתונים, בעיות ואתגרים הניצבים בפני ישראל, וגם הצעות לפתרונות. להלן רשימה חלקית של פרסומי הקתדרה שנגעו בתחומים אלו:

עבודתם של ביסטרוב וסופר (2007) "ישראל 2007-2020 על דמוגרפיה וצפיפות" עסקה בסכנות הרבות שטמונות בפריסת האוכלוסייה הלא מאוזנת של הארץ. חזרנו על כך בפרסומים של 2010 ו-2011. בפרסום אחר באותו נושא (ביסטרוב וסופר 2006, 2008) התרענו בעברית ובאנגלית על התכנסות כל האוכלוסייה הצעירה של ישראל לתוככי "מדינת תל אביב" שהפכה לאיום על ישראל. כן פרסמנו את עבודתו של יורי ברונשטיין על שינוע צה"ל בעיתות חירום (2013) לנוכח הצפיפות הגוברת בעיקר במישור החוף הישראלי. חזרנו לרעיון בצורך ביציאה אל הים ובהקמת איים מלאכותיים בים התיכון בשלוש עבודות: שמואל וייס (2014) "איים מלאכותיים בחופי ישראל – אבן דרך בהתפתחות מדינת ישראל?"; מיכאל בורט (2014) "האופציה הימית – השדרה הכחולה"; ובנימין איזק (2014) "פיתוח בסביבה ימית".

אכן יש להגביר את מאמצי פיזור האוכלוסייה ממישור החוף הצפוף, ובעיקר מגוש דן, כל עוד הקרקע בגליל ובנגב זמינה. כמובן לא הכול יכול לעבור לפריפריה ולכן הצורך הדחוף בבניית האיים מול חופי ישראל.

במסמך זה אנו מסיבים את תשומת הלב לצורך בהתמודדות עם הצפיפות הקשה לא רק בהקמת איים ועלייה לגובה אלא גם מציעים לרדת אל התת-קרקע. הרעיון אינו חדש ומדי פעם מגלים בו עניין דרגים שונים במערכת הלאומית.

בינואר 2010 קיים משרד הפנים כנס שכותרתו "תת-קרקע - מרחב האפשרויות החדש". גם בצה"ל נערכו לא מעט דיונים בנושא, וכך גם במינהל מקרקעי ישראל ובמשרדי ארכיטקטים. המהלך של ירידה לתת-קרקע וניצול יתרונותיה הרבים הם עדיין בעיקר רעיון, ואנו קוראים לזרזו כדרך חיים במדינה הקטנה שלנו.

המינהור טומן בחובו מגוון פתרונות לאתגרי התקופה: החל מצפיפות ודחק שמעל הקרקע וכלה בהתמודדות הביטחונית, וגם כאחת הדרכים להתמודדות של ישראל עם שינויי האקלים.

תודה לעפרה פרי על העריכה הלשונית ולנוגה יוסלביץ על ההבאה לדפוס. תודה מיוחדת לאלופים ה"ה וי"ב על העלאת הרעיון לכתיבה על נושא זה.

ארנון סופר

קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה והמרכז לחקר הביטחון הלאומי, צה"ל

חיפה, נובמבר 2014

מבוא

בשנים האחרונות מחפשים במערכת הביטחון, באקדמיה, במוסדות התכנון בדרגים הגבוהים ובתקשורת פתרונות לסוגיית הצפיפות ובעיית זמינות הקרקעות לבנייה בארץ (בורט וסופר 2014; ביסטרוב וסופר 2007; וייס 2014; ששון-עזר 2010; תמ"א 40, 2011). בשונה מפתרונות זוללי חומרים וכסף אחרים, כגון הקמת איים מלאכותיים, או פתרונות לא פופולריים בעיני כלכלנים, כמו פיתוח הפריפריה (הרחוקות ולא כל כך, בנגב ובגליל), הועלתה לדיון גם האופציה של "התחפרות בתוך האדמה".

במשרד הפנים שקדו על "תמ"א 40 המהפכנית" בסודיות ובקפדנות. כותביה ניסו לגבש כמה כלים במטרה לדרבן בנייה מתחת לפני האדמה, בעזרת מתן תמריצים שונים ליזמים, ואכן הוצעו כמה אופציות מבטיחות לפיתוח התשתיות התת-קרקעיות. כמו כן הופיעו בתכנית המתגבשת פרטים רבים על הצורך בתכנון ופיתוח של אמצעי מיגון לשעת חירום, שכן לאחרונה התברר כי רוב המקלטים מתוך כ-100,000 בישראל, הם במצב לקוי, אינם מתאימים למדיניות המיגון המעודכנת מבחינת זמני הגעה, אינם נגישים לבעלי מוגבלויות וככלל אינם מתאימים לשהייה ממושכת בתוכם.

נוסף על נושא המיגון ושילובו במיזמים השונים, מיינו מתכנני התמ"א את סוגי המבנים הפוטנציאליים שניתנים לבנייה, להעתקה או לשילוב בתת-קרקע. בעקבות זאת גובשו חמש קטגוריות שלכאורה חזו את דרכי ההתפתחות העתידית בתחום. כדי להבהיר את החשיבה התכנונית של מגבשי התמ"א נציג להלן את כולם (תמ"א 40, 2011):

1. מבנים בעלי התאמה מרבית לבנייה בתת-קרקע: בעלי ייעוד לוגיסטי ובהם מחסנים, ארכיונים, מתקני תחזוקה, מתקני תשתיות, חניונים ומתקני שליטה. בקטגוריה זו נכללו גם אתרי פנאי, בידור וספורט שפועלים גם בלי אור השמש: בתי קולנוע, חדרי כושר ובריכות שחייה. גם מערכת תחבורה יבשתית במנהרות קצרות ואפילו ארוכות נכללה בה. לא פחות משמעותית תהיה העברת קווי המתח הגבוה של חברת החשמל לתת קרקע. ישראל תקצור רווח כפול מצעד כזה: פינוי מרחבים רבים ביותר באזורים חיוניים והגברת הביטחון האישי והלאומי.
2. מבנים בעלי התאמה גבוהה לבנייה תת-קרקעית: רוב קווי התשתית לסוגיהם שלא נכנסו בקטגוריה הקודמת, החל ממים וכלה בתקשורת, וכן מכוני לטיהור שופכין ומתקני מיון ומחזור, חדרי מיון וניתוח, מטבחים של בתי מלון, מרכזי תחבורה, תחנות דלק ומרכזי קניות.
3. מבנים בעלי עדיפות נמוכה יותר (מותנית) לבנייה בתת-קרקע: מוזאוני, חדרי ישיבות וכנסים, מעבדות, תחנות לתחבורה ציבורית, תחנות כוח.

4. מבנים בעלי התאמה נמוכה: משרדים, מתנ"סים, חדרי אשפוז, יחידות מגורים, אצטדיונים, חדרי לימוד, מוסדות דת, חינוך, חירום והצלה, מתקני התפלה, מחנות צבאיים וגם תעשיות קלות ומלאכות, תעשייה עתירת ידע ותשתיות לנמלי התעופה.

5. בתור "אינם מתאימים" סווגו: שטחים פתוחים, קרקע חקלאית, פארקים, גנים, יערות, מסלולים של שדות תעופה, וכן מוסדות למינהל ציבורי, אתרי מלונאות ונופש, אטרקציות תיירותיות, מגרשי ספורט ומעגנות בנמלי הים.

ניתן להסכים או לא להסכים עם האחראים על המיזם שהוצג מעלה. אפשר להתווכח ואף להצביע על טעויות, חפיפות ותקלות. ניתן אפילו לעלות שאלות לא מעטות: האם נקודות המוצא של מתכנני התמ"א 40 מטעות? אולי משהו אחר מסתתר מאחוריהן? האם התכניות יצאו לפועל? האם יצליחו לשלב בין הדרישות למיזם לרצונות היזמים? אולי התכנית תיכשל כמו תמ"א 38 מה יהיו התמריצים, אם בכלל? כיצד יפתרו סוגיות משפטיות הקשורות בבעלות על מרחבים תת-קרקעיים? כיצד תבצע ההפקעה (אם בכלל)? שלל שאלות קשות ולא האחרונות, שלא יזכו לתשובות בחיבור הנוכחי.

המסמך לא יעסוק בביקורת תוכנית המתאר. מטרתו לנתח את האפשרויות לפיתוח התחום התת-קרקעי בישראל, מתוך התחשבות במצבה הדמוגרפי, הכלכלי והגאופוליטי של המדינה. כמו כן יסקור המסמך את הרקע ההיסטורי והניסיון העולמי העשיר לפיתוח התחום, ימין, יתאר וידגים את סוגי המבנים התת-קרקעיים העיקריים, את מורכבותם, יתרונותיהם וחסרונותיהם. פרק נפרד ידון במנהור אצל שכנותינו, ורובו יוקדש לשימושים בתת-קרקע שנחשפו במלואם בעקבות מבצע צוק איתן ברצועת עזה. ברצונם של המחברים להדגיש שנקודת מבטם היא גאואסטרטגית. כלומר, הדגש יושם קודם כול על צורכי המדינה, אלה הקיומיים ואלה שיהפכו לכאלה בעתיד הנראה לעין, ולא על נקודות טקטיות שיוכלו להביא תועלת מיידית לגופים אינטרסנטים שונים, לצרכים פוליטיים, לתכסיסים תקשורתיים או לפרט.

לפני שניגש לעומקו של הנושא ננסה להגדיר במדויק מהו ה"תת-קרקע" שיידון בחיבור הנוכחי. מתחת לפני האדמה נמצאים סלעים במצב צבירה שונה, מים, חומרים ביולוגיים, שלא לדבר על מגוון רחב של שרידי פעילות האדם, כגון שכבות תרבותיות שונות המוכרות לארכאולוגים. כל אלה אינם עיקר עיסוקנו. בחיבור הנוכחי, המושג "תת-קרקע" חל על חללים או מרחבים תת-קרקעיים (טבעיים, מלאכותיים או משולבים), שיכולים לשמש לבנייה תת-קרקעית לשימושים שונים.

לכאורה, מעמקי הפלנטה שלנו טומנים בתוכם שפע שטחים שמחכים לניצול. האומנם? מתברר שלא בדיוק. אומנם רדיוס כדור הארץ הוא 6,370 ק"מ, אך לא כל מקום בו ניתן לבנייה תת-קרקעית. כדי

לסבר את האוזן, נציין כי הקידוח העמוק ביותר שנעשה אי פעם בכדור הארץ היה של 12.2 ק"מ. תנאי הטמפרטורה והלחץ בעומק זה מזכירים את אלה שעל פני כוכב נגה (מאות מעלות צלסיוס ועשרות אטמוספרות). המכרות העמוקים ביותר בדרום אפריקה הגיעו עד שישה ק"מ. הטמפרטורה בהן מגיעה לכ-60 מעלות צלסיוס ותנאי העבודה, למרות כל ציוד העזר, קשים ביותר.

כפי שניתן להסיק מהדוגמאות, התחפרות בקרקע מעמידה אתגרים לא מעטים. עם זאת, מאות המטרים הקרובים ל"מפלס האפס" או לפני הקרקע, שתנאי הלחץ והטמפרטורה בהם אינם שונים בהרבה מאלה שעל פני הקרקע, מאפשרים לבנות שפע מתקנים או מבנים פוטנציאליים, בני מיליארדי מ"ק, שאינם מוגבלים בממד האופקי. בתכנון הנדסי מתקדם (צורכי אוורור, תאורה, תחבורה, בידוד ממים, ניקוז, אבטחה משריפות וכדומה) ניתן ליצור ערים תת-קרקעיות שלמות, ולפחות לשלב ערים קיימות במרחב האורבני שנמצא מתחתיהן. מכל מקום, התת-קרקע הוא פתרון מועדף בכל הקשור לתשתיות – בלעדיהן תפסיק הציוויליזציה האנושית המודרנית להתנהל במתכונתה הנוכחית.

הניסיון העולמי המצטבר של אדריכלים ומתכנני ערים בתחום מרשים ביותר. בערים הגדולות (המונות יותר משני מיליון נפשות) של אירופה ובייחוד באלו של צפון אמריקה נמצאים במרחבים התת-קרקעיים כ-70% של החנוונים, כ-80% של המחסנים, כ-50% של הארכיונים וכ-35% של המשרדים. רכבות תחתיות, כבישים, מנהרות ומחלפים תת-קרקעיים מצילים את כרכי הענק מפקקים, מחברים אותן ביעילות אל הפריפריית שלהן ויוצרים מרחב אורבני אינטגרטיבי. למותר לפרט את נחיצות התת-קרקע לתשתיות המים, לביוב, לחשמל ולתקשורת, שלא לדבר על צורכי הביטחון במדינות השונות; מרבית המתקנים הרגישים, ההתקפיים, ההגנתיים והעורפיים הוחדרו מתחת למסלע והוסוו בגופי המים שמעליהם ובשפע אמצעים נוספים.

פרק א. הכרחיות השימוש בתת-קרקע בישראל והדרך לכך

עבודות רבות כבר התמקדו בפיתוח תחום התת-קרקע בארץ (למשל, לישר ואחרים 1997). לא נסקור אותן, נסתפק במספרים יבשים, ואלה בלבד יוליכו אותנו למסקנות בדבר היתרונות של הירידה לתת-קרקע.

צפיפות המגורים. על פי נתוני מנהל מקרקעי ישראל, שטחי הקרקע בגבולות הקו הירוק, בתוספת רמת הגולן וללא שטחי אגמים וחופים) מסתכמים בכ-22 אלף קמ"ר (כ-22 מיליון דונם). מזה יש להחסיר כאלף קמ"ר של קרקע לא מסודרת, הנמצאת בבעלות לא ידועה או בסכסוך. עוד כ-1.5 מיליון דונם נמצאים בבעלות המדינה (קק"ל ורשות הפיתוח). נותרו אפוא כ-19.5 מיליון דונם. מאלה יש להפחית את השטח שתופסים מערכת הביטחון וצה"ל. לפי הערכות שונות מדובר בכדי חצי מהעתודות, רובן בנגב. השטח החקלאי בארץ מסתכם בכ-3 מיליון דונם. אם נסיר את כל שאר השימושים, נמצא שהיקף השטח הבנוי בישראל עומד כיום על כ-1.3 מיליון דונם, שהם כ-6% מסה"כ השטח בישראל, וצפויה פלישה או גלישה לשטחים פתוחים בעקבות הקמת שכונות חדשות ביישובים קיימים. פלישה כזאת היא בלתי נמנעת: בסוף ינואר 2014 מנתה אוכלוסיית ישראל כ-8.5 מיליון נפש. צפיפות האוכלוסין בארץ היא מן הגבוהות בעולם המערבי - כ-368 נפשות לקמ"ר - והיא תלך ותגדל בשל ריבוי טבעי והגירה מבחוץ. צפיפות זו מורכבת, שכן רוב אוכלוסיית ישראל (יותר מ-92%) מתגוררת ביישובים עירוניים, והם אלה שמהווים את רוב רובם של אותם ששת האחוזים או 1.3 מיליון הדונמים של השטח הבנוי, רובם מצפון לבאר שבע.

חניה. מספר כלי הרכב בישראל כבר חצה את הרף של 2.76 מיליון (אברהם 2013). מתוכם כ-2.25 מיליון נמצאים בבעלות פרטית. הסטטיסטיקה מראה, כי מספר זה גדל מדי שנה בהתאם לאוכלוסיית ישראל הגדלה. כל כלי רכב צורך מקום חניה הגדול משטחו. אם נכפיל את השטח הממוצע שתופס רכב בחניה רגילה (כ-8-6 מ"ר של הרכב עצמו ושטח דומה הדרוש למסגרת היקפית), יתברר כי כלי רכב הוא צרכן נדל"ן לא פחות משמעותי מאשר בן משפחה שיש לו חדר שינה מרווח בבית. על פי התקנים של משרד התחבורה, המגדיר חניה תקנית כבעלת שטח של 25 מ"ר (כולל שטחי מעבר ותמרון), מתברר שהחניה בארץ גוזלת שטחי עתק: 69 אלף דונמים לפחות. בפועל הנתון כנראה גדול בהרבה, שכן לא כללנו בחישוב משאיות, אוטובוסים ומקומות חניה מתוכננים מראש שנמצאים ליד הבתים, מקום העבודה ומרכזי הקניות, הספורט והבידור. כדי להמחיש עד כמה גדול המספר הזה נציין כי סה"כ שטח הכבישים בארץ הוא כ-150 אלף דונם; שטח מחוז תל-אביב הוא 172 אלף דונם, וכ-68.8 אלף דונם מתוכם משמשים לבנייה למגורים. המסקנה המתבקשת - יש להוריד את החניונים לתת-קרקע, מה גם שהם יוכלו לשמש גם מקלטים, מחסנים ועוד.

כבישים. לבעיות החניה נוספת בעיית הכבישים, בעיקר במרכזים האורבניים הצפופים של מטרופולין תל אביב ובכל מישור החוף. כפי שכבר צוין, שטח הכבישים בארץ הוא כ-150 אלף דונם. כלומר, צפיפותם עומדת על 84 ק"מ לכל 100 קמ"ר. זהו מדד דומה לזה של יוון ושל יפן (89 ק"מ כל אחת). הוא גם לא רחוק מזה שבשטחי הרשות הפלסטינית, בין היתר בעקבות הבנייה הישראלית שם (כ-78 ק"מ). על פי נתוני הבנק העולמי, בהשוואה לשכנותיה במזרח התיכון, מצבה של ישראל מעורר קנאה: בירדן עומד הנתון על 8 ק"מ, בעירק – על 10 ק"מ, במצרים – על 14 ק"מ, בסוריה – על 38 ק"מ ובטורקיה – על 47 ק"מ. עם זאת, רמת החיים ומספר כלי הרכב בישראל עולים בהתמדה. ב-2010 דובר על 272 כלי רכב לאלף נפשות, לעומת כ-33 במצרים ובקרב הפלסטינים, 36 – בסוריה, 104 – בטורקיה ו-123 בירדן. המדד בישראל דומה לזה של מונטנגרו, סרביה ובלארוס (The World Bank 2010). לעומת מדינות מזרח אירופיות ודרום אירופיות, רמת המינוע בישראל מתקרבת לזו של אירופה המערבית. על כן, רק כדי לשמור על הקיים חייבת רשת הכבישים לגדול.

רשת הכבישים המתרחבת נתקלת בבעיות גאוגרפיות וגאופוליטיות-ביטחוניות. נתון סטטיסטי נוסף של הבנק העולמי מ-2010 חושף את הבעייתיות של צפיפות הכבישים בארץ. ב-2010, מספר כלי הרכב בארץ לקילומטר אחד של הכביש עמד על 133, לעומת 37 בצרפת, 77 בבריטניה, 64 בהולנד ו-44 באוסטריה. ישראל עודנה רחוקה ממונאקו הצפופה ביותר, שם הנתון קיצוני ביותר – 574. באזורנו, רק לירדן עם בעיות התשתית הרבות שלה המספר גבוה יותר – 141. ב-2005 היחס שבין הקילומטרז' של נסיעה לכל ק"מ של כביש סלול עמד בישראל על 2,372. כדי להבין את הנתון, יש להקבילו לזה של מדינות המפותחות בעולם. בקוריאה הדרומית הוא עמד על 1,552; בבריטניה – 1,196; בהולנד – על 978.

כבר כיום אין מקום לסלול עוד כבישים במקומות המאוכלסים ביותר בארץ, בייחוד לא האורכיים (בכיוון צפון-דרום) מבלי לגרום לנזקים סביבתיים ואורבניים כואבים (ראו לדוגמה את היקף הנזקים הנגרמים לנוף בשער הגיא ובהרצליה – שם מאריכים את כביש 2 צפונה). בלי פיתוח תחבורה רב-מפלסית, בדגש על זו התת-קרקעית, עלולה הליבה הכלכלית של ישראל להפוך לפקק אחד גדול (קרת וציפורי 2014). אם לא תיכנס ישראל עמוק מתחת לפני האדמה בתחום התחבורתי, צפויה המדינה לבזז מיליארדים אך ורק לשם פתרונות חלקיים ולא יעילים למצוקה בטווח הארוך. החשש העיקרי הוא ברגעי שעת חירום – שבהם הדוחק בכבישים יכול להפוך לבעיה אסטרטגית ולאיום על הביטחון הלאומי (ברונשטיין 2013). לפי חישובים ראשוניים, יידרש סכום של רבע טריליון שקל כדי לסגור את הפער שנוצר במהלך השנים בתשתית התחבורה הציבורית בישראל בהשוואה לזו שבעולם המפותח. הנזקים הנגרמים בשל הצפיפות והפקקים מוערכים ב-15 מיליארד שקל לשנה (בעיקר עקב אובדן שעות עבודה). אף זה מוביל למסקנה של הפניית התחבורה לתת-קרקע.

ומה בנוגע לחזון הרכבת התחתית של תל-אביב? מתברר שרכבת תחתית לא תיתן מענה מספק לתל-אביב ולסביבתה, גם אם תיחנך בשנת 2021; יהיה צורך להרחיבה לכל הערים והיישובים שבמישור החוף. לא פחות חשוב יהיה לשקול הקמת כבישים מהירים תת-קרקעיים ביבשה, ואולי מתחת לים במקביל לחופי ישראל (איזק 2014).

קבורה. ב-2014 מנתה אוכלוסיית ישראל יותר מ-8.5 מיליון תושבים. בעוד 80 שנה רוב המיליונים הללו כבר יהיו בעולם שכולו טוב. כל אחד מהם יזדקק לקבורה. כל קבר זקוק לשני מטרים רבועים לפחות. לכך יש להוסיף את המעברים בין חלקות וגושים, את דרכי הגישה לאתר ותשתיות נלוות. נוכל לקבוע באופן הצנוע ביותר, כי שטח קבר יחיד הוא כ-4 מ"ר. הכפלת נתון זה בכ-8 מיליון מביאה לתוצאה של 32 אלף דונם של שטחים לקבורה. קרקע זו מצטרפת לאלפי דונמים שכבר נוצלו עבור מאות בתי קברות עכשוויים ועתיקים יותר. אלא שכאן הגישה התת-קרקעית דווקא מיותרת. הקבורה ב"קומות" התבקשה כבר לפני שנים רבות, ורק עכשיו היא מתממשת.

אתרי כליאה ומעצר. ב-2014 יש בישראל 33 מתקני כליאה ומעצר שמאכלסים כ-20 אלף אסירים, פליליים וביטחוניים. מספר זה לא רק שאינו צפוי לרדת בקרוב, אלא שקיים הצורך להרחיב את התשתיות: למצוא מיקום נוסף למתקנים, להתאים את גודלם וייעודם לדרישות המתחדשות. חלק מהמתקנים מיושנים (נבנו עוד בתקופת המנדט), אחדים הוסבו לשימושי כליאה ולא תוכננו או נבנו ככאלה מראש, חלקם ממוקמים קרוב לאתרים רגישים, חלקם אף קרובים לגבולות. חלקם קטנים, אך ישנם "ערי אסירים" שלמות, כגון המתחם של ארבעת בתי הסוהר ליד באר שבע והמתחם הגדול של בית הסוהר קציעות. בכל בתי הסוהר הללו שוהים אלפי אסירים ועצורים בתנאי צפיפות חמורים: לעתים השטח מגיע לשני מ"ר לאסיר או לעציר (משרד המשפטים 2013). יש אפוא לשאול, אם אין מקום לתשתיות בתי מעצר וכלא תת-קרקעיים. אין בכך חלילה רמז לשלילת הזכויות לאור השמש מן האסירים, אבל אין ספק שניתן להוריד לתת-קרקע מגוון שירותים ומתחמים, ובכך ליעל את האבטחה, להגדיל שטחים ולשפר את תנאי המאסר.

מקלטים. מיותר לפרט מדוע אי-אפשר להכין במהירות מקלטים תת-קרקעיים ציבוריים, חדשים ומודרניים, לשמונה מיליון תושבי ישראל (ב-2014). הדבר גם לא בהכרח דרוש. לחלק מהאוכלוסייה יש ממ"דים, אחרים יוכלו להסתתר בחניונים תת-קרקעיים שימוקמו (אם ימוקמו) בערים הגדולות. בינתיים כבר אושרו בתל-אביב כ-60 חניונים תת-קרקעיים פרטיים בשטח כולל של 850,000 מ"ר ובתכולת הכוללת של כ-800,000 נפש (ארנון 2012). בכל מקרה, יש צורך רק במספר קטן של מתחמים גדולים, סוג של "מיני ערי מקלט" שיוכלו לשמש אוכלוסייה של יישוב או מקום כלשהו שיצטרך להתפנות מסיבות כאלו ואחרות ולשהות זמנית במרחב תת-קרקעי מוגן.

כיום, במקרה אסון כלשהו, כגון הפצצה ארוכה ומסיבית, כפי שכבר קרה בדרום פעם אחר פעם (בשנים 2000–2014) או בצפון (מאז שנות החמישים), תצטרך המדינה לפנות אוכלוסייה רבה. כיום, טווח הטילים של אויבי ישראל יכול להגיע לכל נקודה בשטחה. יש להזכיר כי מלחמות פורצות לא רק בקיץ (כמו ב"צוק איתן", "עופרת יצוקה" ו"עמוד ענן"), שבו אפשר לבנות "עיר אוהלים" על חוף הים.

נחוץ אפוא לייעד מתקנים תת-קרקעיים לפינוי, שיהיו מוכנים עם כל התשתיות הדרושות לאכסון אוכלוסייה: מים, ביוב, חשמל, תקשורת ותשתיות חברתיות בסיסיות. למי שנבהל מההשקעה האדירה שהדבר דורש כדאי לזכור את אסון ההוריקן קטרינה בניו-אורלינס. השהות באיצטדיון חצי-פתוח של 20 אלף מפונים וכ-500 אנשי המשמר האזרחי – ללא סידור מרחבי מתוכנן מראש, בלי מאגרי מזון, מים, ללא ציוד, שירותים ועזרה חיונית, בלי חשמל ותקשורת, עם אבטחה קלוקלת, מעשי ביזה, גניבות ומעשי אלימות – נתפסה על ידי שוהים כגיהנום עלי אדמות (Harris 2008). סביר להניח כי במתחם תת-קרקעי שקט ומסודר לא היו המפונים סובלים כפי שסבלו.

משרד הביטחון ושימושים אחרים. בניתוח הביקושים הצפויים לקרקע טרם דנו בצרכים החדשים של מערכת הביטחון, בצרכים הנוספים של תשתית המים והביוב, בכל הנוגע להטמנת פסולת בתת-קרקע בניהול נכון ורגיש.¹ לא הזכרנו את הצורך במחסנים למקרי חירום, שמיקומם האידאלי הוא בתת-קרקע המוגנת ולא על פני הקרקע החשופות למעשי טרור ולסכנות המלחמה (ממגורות כגון דגון, מחסני קירור). גם לא פירטנו את מבני התת-קרקע בתוך ערים או בקרבתן, שישרתו מערכות אורבניות (מרכזי מסחר, שווקים סיטונאים וכדומה).

הפרק הבא ידון במגוון השימושים ההיסטוריים במבנים תת-קרקעיים.

1 אתרי הטמנת הפסולת בארץ, בעיקר פסולת מסוכנת, מוקמו כל השנים הרחק מעיני הציבור, בעיקר בנגב השומם. אלא שתכניות פיתוח הנגב, ובייחוד בניית עיר הבה"דים, אילצו את הנוגעים בדבר לפנות את אתרי הפסולת המסוכנת. היום ברור שהנגב הוא אמנם האזור המתאים להטמנת הפסולת, אך בתת-קרקע ולפי תקנים מערביים נוקשים (Zimmels et al. 2006).

פרק ב. פיתוח התת-קרקע: רקע היסטורי

השימוש במרחבים תת-קרקעיים נפוץ עוד בתקופה הפליאוליתית, תקופת האבן. מנהרות ומערות טבעיים היו מקומות אידאליים למטרות רבות של האדם הקדמון: למגורים, לבארות מים ולמאגרי מזון, להפקת מחצבים בסיסיים ולקבורה ולצורכי פולחן. בשלב מסוים למדו בני האדם לא רק לנצל מרחבים תת-קרקעיים טבעיים, אלא גם ליצור כאלה בעצמם, מכמה סיבות:

- פיתוח מכרות ומחצבות – את העתיקים ביותר ניתן לתארך לאלף השביעי לפסה"נ (Shepherd 1993; Lynch 2004)
- הצורך בקבורה מוגנת מפני בוזזים, בדגש על תלי הקבורה של פרעוני מצרים מהאלף השני לפסה"נ (El Salam 2002)
- צורכי הגנה ותשתיות – בעיקר מעברי מים תת-קרקעיים ומנהרות אספקה, ששימשו ערים נצורות – האלף הראשון לפסה"נ (Sandström 1963)

ארכאולוגים גילו פלאים הנדסיים תת-קרקעיים בני אלפי שנים ששימשו למטרות שונות. חלקם תוכננו בידי האדם וחלקם היו טבעיים ורק עובדו ותואמו לצורכיהם השונים של התושבים. כך למשל המנהרה התת-ימית הראשונה המתועדת בהיסטוריה, מהאלף השלישי (2180 לפסה"נ). מדובר בהמצאה גאונית של מהנדסי בבל, שבחרו לא לבנות גשר שייהרס בכל הצפה או שיפריע לספנות על נהר הפרת, אלא לחפור מתחת לנהר (Kirkland 1989). ממדיה יכולים להרשים את מתכנני ההווה: אורך המנהרה 900 מ', רוחבה 4.9 מ' וגובהה 3.9 מ'. וכל זה מתחת לנהר שעומקו יכול להגיע לעשרות מטרים, מה גם שמתחת למים היו עשרות מטרים נוספים של אקוויפרים.

לא פחות מרשימה היא תעלת מים תת-קרקעית במנהרה מלאכותית באורך 1.6 ק"מ וברוחב וגובה של 2 מ' שנבנתה באי סאמוס באלף הראשון (522–530 לפנה"ס). מנהרה זו נחפרה בתוך הר סלעי קשה לעיבוד יותר מאשר החול והסחף בבבל. אספקת מים שוטפת למבצר של האי באמצעות המנהרה שנבנתה הפכה את סאמוס לבלתי מנוצחת ביוון העתיקה (Apostol 1995).

מקדש לאל הרפואה אסקלפיוס, שהיה מעין שילוב של אתר קבורתו והנצחתו עם בית מרפא, שנבנה בפרגמון במאה הרביעית לפסה"נ (ליד העיר ברגמה שבטורקיה), מציג גישה חדשה לשימוש בתת-קרקע (Remus 1996): בתוך בור ענק שנחפר הונחו לא רק תשתיות המבנה, אלא חלק גדול מהמתקן כולו, על רוב קירותיו, עמודיו התומכים (בגובה של 5 מ'), התקרה וכל השאר. עם השלמת הבנייה כוסה המבנה בקרקע, ובינו לבין אתריו האחרים חיברו שתי מנהרות באורך של כ-50 מ'.

עשרות ערים תת-קרקעיות (36 שלמות ועשרות מתקנים מקובצים פחות וקטנים יותר) בקפדוקיה (אנטוליה בטורקיה של ימינו) מרשימים את החוקרים מאז הוחל בחקר שיטתי שלהן בשנות

השישים של המאה הקודמת. באזור התגלו מערכות תת-קרקעיות המורכבות מלא פחות מ-18 קומות (לפחות 80 מ' של מפלסים בגובה של 2 מ' ואף יותר לכל קומה, וכל שנה מתגלים כוכים וחדרים בעומקים ניכרים יותר, אם כי בגבהים נמוכים יחסית). מתקנים אלו הרכיבו אלפי "חדרים" קטנים יחסית וכן "בתי מלאכה", מאגרים ואולמות (של כ-300 מ"ר ואף יותר). מכלול המבנים יכלו לאכלס עשרות אלפי תושבים בנוחות יחסית. בקומות הקרובות יותר לפני הקרקע שוכנו בעלי חיים (צאן, בקר, עופות). כמה מבנים תוכננו כ"מטבחים שיתופיים". שפע תנורים להדלקת אש בחדרים תת-קרקעיים מיוחדים שימשו להכנת מזון ולחמום בעת הצורך. בדרך כלל הטמפרטורה בתת-קרקע של קפדוקיה סביב 10° צלזיוס.

הערים התת-קרקעיות בקפדוקיה הצטיידו במגוון מעברים דמויי מנהרות, וברובם היו דלתות ושערים שדרכם יכלו לעבור אף כרכרות. מאות כניסות גלויות ונסתרות קישרו בין העולם החיצוני לתת-קרקע. לצורכי הקשר בין המפלסים ולאורור סודרו עשרות פירים אנכיים בקוטר של כ-1.5 מ'. עומקם הגיע עד לשכבות שלא ניתנות היו לשימוש (אלו הרוויות במים). עד היום ניתן לעבור מתחת לקרקע בכל כיוון אפשרי ולנשום אוויר נקי יחסית. מהנדסי העבר לא זנחו גם את צורכי הסניטציה והניקוז. שפע פתרונות יצירתיים נועדו לשפר את החיים במתחמים התת-קרקעיים (Aydan and Ulusay 2003). חשוב לציין, כי אוכלוסיית קפדוקיה לא בחרה מרצון לרדת לתת-קרקע, אלא נאלצה לעשות זאת בשל מלחמות ורדיפות דתיות.

בארץ ישראל נבנתה מערכת מנהור ביהודה, בשומרון ובגליל, בעיקר בתקופת מרד בר-כוכב (Tsafirir and Zissu 2002). עוד לפני כן, בימי המלך חזקיהו (אמצע האלף הראשון לפסה"נ) שימשו מערכות תת-קרקעיות את תושבי ירושלים להעברת מים (Lewy 2006; Barghouth and Al-Saed 2009). האדריכלים הנבטים בפטרה, בנגב ובמדבר יהודה השאירו שרידי תשתיות תת-קרקעיות הנחוצות להשרדות בתנאים פיזיים ואקלימיים קשים כמו במרשה (בשפלת יהודה), בחצור ובמגידו (Levy 2008). מבנים לא פחות מופלאים תכנן ובנה הורדוס (Netzer 2008). תפקיד נוסף, הנפוץ ביותר, של התת-קרקע היה השימוש בו למטרות קבורה (della Dora 2011).

השימוש המסיבי בתת-קרקע במזרח התיכון התאפשר בעיקר בשל תנאים גאולוגיים וגאומורפולוגיים מסוימים: ריבוי מנהרות קרסטיות (בסלעי הגיר), או סלעים נוחים לחפירה, כגון טוף (קפדוקיה) (Bertini 2010). הרומאים, ששלטו והפיצו את תרבותם באזור, הובילו לשיפור טכנולוגי משמעותי בתחום התת-קרקע והמנהור. רומי עשתה שימוש רב במרחבים תת-קרקעיים, החל ממעברי מים, מנהרות וכלה במכרות להפקת מלח, מתכות ופחם. תשתיות רבות להצגות בקולוסאום ובמתקנים דומים ברחבי האימפריה הרומית מוקמו בתת-קרקע, מתחת לבימה (Multhauf 1978; Davies 1979).

בימי הביניים, הנצרות שהשתלטה על אירופה הולידה התיישבות חדשה בתת-קרקע. מנזרים שלמים או חלקים מהם, מפורטוגל עד רוסיה, התחפרו מתחת להרים, ליערות ואף לאגמים ולביצות. עם זאת מאז עידן רומי, על פלאיה ההנדסיים הרבים, לא נרשמו בתקופה זו שיפורים טכנולוגיים משמעותיים (Piboule 1971, 1978).

שינויים מרחיקי לכת בתחום המנהור חלו במאה ה-19 ובראשם הסדרת מערכת הביוב בעריה הגדולות של אירופה והשימוש הנרחב במרחבים תת-קרקעיים ענקיים מתחת לערים לשם הטמנת עצמותיהם של מיליוני תושביהן לשעבר (Gandy 1999; Pike 2011).

המצאת הדינמיט איפשרה שיפורים והתייעלויות בכרייה התת-קרקעית. עתה נחפרו מנהרות למסילות ברזל ולכבישים שנועדו לקשר בין מרכזים עירוניים תעשייתיים חשובים. אולם המהפכה האמיתית התרחשה רק עם הופעת טכנולוגיות פחות אלימות ויותר מבוקרות מאשר פיצוץ: מיכון הקידוח, הכרייה, החפירה והפינוי של תוצריהם (Robbins 2000). בעזרת מכונות אלו התאפשר אף לחבר במנהרות תת-קרקעיות בין יבשה לאי. כיום, שיא הטכנולוגיה הזאת הוא בחיבורה של בריטניה לצרפת במסילת ברזל העוברת במנהרה מתחת לתעלת לה-מאנש (Anderson and Roskrow 1994).

המיכון המתקדם הביא לשיפורים רבים בתחום המנהור. טבלה 1 מראה עד כמה שיפור וייעל המיכון את התפוקה. בין היתר הוא איפשר בניית מערכות מפותחות של רכבת תחתית בתוך מרכזים אורבניים סואנים. כבר ב-1863 התחילה לפעול הרכבת התחתית של לונדון. ב-1869 השתמשו בחידוש זה באתונה. שתי תחנות תת-קרקעיות נפתחו באיסטנבול ב-1875. ב-1896 נחנכה הרכבת תחתית בגלזגו וגם בבודפשט. מאז כמעט מדי שנה אומצה המערכת התחבורתית התת-קרקעית בערים הגדולות של העולם המפותח: בוסטון ושיקגו (1897), פריז (1900), ברלין (1902), בואנוס איירס (1912), טוקיו (1925), מוסקבה (1935), קהיר (שנות השמונים). נוסף על ייעודן המרכזי (שינוע בני אדם), שימשו תשתיות הרכבת התחתית להעברה ותחזוקה של תשתיות תת-קרקעיות

אחרות, ויש כאלה שהפכו לערים תת-קרקעיות שלמות, עם מקלטים, מאגרי חירום, תחנות כוח, מצבורי נשק, מערכות קשר ותחבורה סודיים (Andrzejewski 2010).

מרחבים תת-קרקעיים ריקים או כאלה שחדלו להשתמש בהם הפכו למאגרי מים. אלה שימשו לא רק לצורכי תעשייה ולאספקת מי שתייה, אלא הפכו לאוגרים אופרטיביים לתחנות

טבלה 1: תפוקת ממוצעת של מטר מעוקב בקידוח לשעת עובד בשנים שונות

שנה	תפוקה לשעת עבודת קידוח (במטר מעוקב)
1920	5
1940	8
1960	20
1980	160
2000	260

מקור: Kovernen Bau & Betriebs GMBH

הידרואלקטריות תת-קרקעיות. התחנות הראשונות נבנו בארצות הברית (1898), ובגרמניה (1912), ומאז הן נפוצות בעולם. נראה כי כשישית מסך ההספק המותקן של תחנות הכוח ההידרואלקטריות בעולם מוצאה מהן (Côté 1972; Fox 2001).

מרחבים תת-קרקעיים שנותרו ממכרות שננטשו הוסבו למחסנים שימושיים ויעילים לכל דבר ועניין. החלוצה בתחום הזה הייתה גרמניה. לפני מלחמת העולם הראשונה הוקם בה מפעל תת-קרקעי לייצור מכשירים מדויקים אופטיים וחשמליים, לצרכים צבאיים ואזרחיים. התברר שמכרות מלח ומחצבות אבן גיר ישנים מתאימים לכך ברוב המדדים הטכנולוגיים הבטיחותיים: מפלסים מרובים ברוחב של 15–30 מ' ובגובה 10–15 מ'; דיפון בעזרת בטון מחוזק, או לבנים, אוורור וניקוז יעיל, היעדר ויברציה, מעט אבק, מיקרו-אקלים קבוע וכיוצא באלו. מכרות המלח גם נחשבו לאתרים אידיאליים לטיפול במחלות נשימה. יש כאלה עד ימינו ברומניה ובמדינות אחדות של ברית המועצות לשעבר.

בין שתי מלחמות העולם התחילו רוב מדינות אירופה להתחפר מתחת לאדמה. מפעלים צבאיים ואזרחיים רגישים ביותר (תעשיות חיל האוויר, מפעלי תחמושת, מאגרי נשק ודלק) ואחרים (מפעלי טקסטיל ועיבוד מזון) הועתקו חלקית לתת-קרקע. מקלטים, בונקרים ומערכות הגנה מתקדמות (ברוח לתקופה) תפקדו מתחת לעומק הסלעים. מלחמת העולם השנייה חשפה שימושים צבאיים ואזרחיים רבים בתת-קרקע. היפנים בנו מתקנים תת-קרקעיים בשטח של כ-280,000 מ"ר לתעשיית מטוסים. בגרמניה היו בסוף מלחמת העולם השנייה 1,300,000 מ"ר מפעלים במנהרות ועוד 5,600,000 מ"ר נשאר בתכנון. החפירות נעשו באמצעות מיליוני עובדי כפייה מכל רחבי אירופה. בתת-קרקע שוכנו מקלטים, מפקדות ומטות, שפע של מחסנים, מאגרים, סדנאות ובתי חולים. נסללו גם כבישים תת-קרקעיים מהירים.

בעלות הברית מצדן הקימו מערכות מקלטים במבצרים היסטוריים באי מלטה, ומנהרות kings way - כחלק ממכלול עצום של המבנים התת-קרקעיים המשולבים ברכבת התחתית של לונדון. אלו הן מערכות ההגנה המושלמות של תקופתן (Glover 2003; Hofman 2009). חלקן ננטשו בינתיים או הוסבו לצרכים אזרחיים. עם זאת יצוין, כי חלק מתכניותיהן של בעלות הברית לשעבר עדיין סודיות (ולעתים ספקולטיביות). לא מן הנמנע כי כיום יש תכניות להגנה מפני נשק לא קונבנציונלי (Kennedy 2008).

להלן נסקור חלק מהפרויקטים התת-קרקעיים שנבנו במטרה להגן על אוכלוסייה בארצות עולם שונות החל משנות השלושים של המאה הקודמת ועד ימינו. ממדי הבנייה והחשיבה האסטרטגית של המתכננים והבונים משקפים את החשיבות הרבה שהמדינות ייחסו למקלטים תת-קרקעיים ולתשתיות הנלוות להם.

גיברלטר. מערכת רב-מפלסית המאפשרת תפקוד תת-קרקעי ללא הפרעות חיצוניות לרבות פגיעה ישירה במתקנים בוצעה בגיברלטר על ידי מחלקת ההנדסה של חיל ההנדסה הבריטי, בסיוע כורים מקצועיים. מטרת המתכננים הייתה ליצור מערכת מנהרות גדולה ובה אולמות גדולים יחסית, שתתפקד לפחות שנה במנותק מהעולם החיצוני אך תוכל להעניק את כל השירותים הנחוצים לאוכלוסייה ששוהה בה. המערכת כללה מבנים קלים לשהייה ולאחסון, מאגרי מים, תחנת כוח, בית חולים ומתקנים נוספים. האולם הגדול ביותר של המערכת הגיע לממדים הבאים: 114 מ' אורך, 15 מ' רוחב וגובה מרבי של 3.3 מ'. הכניסות מוגנו במערכות הנדסיות צבאיות ואזרחיות מתקדמות, וכללו בין היתר תאים לקליטת הדף. כמו כן נבנו קירות מגן חופפים חלקית, שכיסו לפחות שלושה רבעים מרוחב המנהרות.

אנגליה. בארץ האם של גיברלטר בוצעו עבודות מקלוט לא פחות משמעותיות. הבריטים מצאו לנכון להסב מנהרות קיימות, שהחשובות שבהן היו ברמסגייט (Ramsgate), בפורטסמות (Portsmouth) ובדובר (Dover). בערי נמל אלו הושם דגש מיוחד על מנהרות אחסנה. הרחבתן והתאמתן לייעודן החדש בוצעה בעת מלחמת העולם השנייה (כמאה שנים לאחר כרייתן). ברמסגייט אף הצליחו להתאים חלק מהמנהרה לתוואי הרכבת באורך של 3.2 ק"מ, וחלק אחר לקליטת מיטות אשפוז. בסופו של דבר המנהרה שימשה מחסה לכ-50,000 איש. בכניסה אליה נעשו שתי שבירות זווית למניעת הדף. מנהרות הרכבת התחתית בלונדון כבר הוזכרו לעיל. אין לזלזל בתפקודן בעת ה"בליץ", אך חשוב לציין כי הבעיה המרכזית הייתה תברואתית: הן לא נבנו במטרה לאכלס רבבות לתקופה ממושכת. בשנות המלחמה בנאצים התגבר החשש מהתפשטות מגפות עקב צפיפות והיעדר שירותים במנהרות. המיגון היה חלקי בלבד ולא תמיד עמד בתנאי פגיעה ישירה, שכן עומקי הרכבת התחתית לא תוכננו בהתאם ליכולת החדירה של פצצות האויב, שהלכו והשתפרו עם הזמן, אלא לפי שיקולים אחרים.

ארה"ב. העשירה והמפותחת בין מדינות העולם, בעלת יכולת-על בנושא התת-קרקע, הן בהיבט הכספי הן הטכנולוגי, לא ביצעה תוכניות מינהור מקיפות למטרות מקלוט אזרחי, על אף עבודת בדיקה שנעשתה בתחום בשנות השישים בעקבות החשש ממלחמה גרעינית עם ברית המועצות. בכל זאת פותחו כמה טכנולוגיות ייחודיות, למשל פרויקט של פיקוד האוויר האסטרטגי שיושמה בו שיטת בנייה על גבי קפיצים שנועדו לשיכוך אפקטים של זעזוע כתוצאה מפיצוץ.

שוודיה. תפיסת ההתגוננות בשוודיה היא בין המחמירות והמתחשבות והאיכותיות ביותר בעולם המערבי. המערך של מרחבי מיגון ציבוריים כולל כ-6 מיליון מקומות מקלוט מתוך 5.8 מיליון הנדרשים. המקלטים שנבנו הם מכמה סוגים: אלו שנועדו למרכזי בקרה ומפקדות, וכן מקלטים ציבוריים גדולים (שיועדו לשהייה בו-זמנית של 15,000 איש) וקטנים (שתוכננו לקלוט עד 180

איש). המקלט מספק הגנה מפני נשק גרעיני, כימי, ביולוגי וקונבנציונלי. בכל מקלט מותקנת מערכת אוורור נפרדת. קיימות מערכות טיהור וסינון נפרדות לאוויר ולמים. במקלטים אף מתוכננת אפשרות להכנסת אנשים מבחוץ לאחר שהמתקן נסגר, דרך מתקני טיהור מבודדים.

השוודים אף היו הראשונים שפיתחו מערכת טיהור מי קולחין תת-קרקעית (1939). את הניסיון השוודי העשיר חיקו הפינים ובמיוחד הנורווגים. הם ייחסו לתת-קרקע שפע סגולות ושימושים, החל ממיקום תחנות כוח גרעיניות וכלה בהשקעות ל"יום הדין". באיי סבאלברד שבאוקיינוס הקרח הצפוני בנו הנורווגים מערכת מנהרות, מן "תיבת נוח", לאחסנת מאגרי מידע של הציוויליזציה המודרנית וזרעים למקרה של אסון גלובלי, מתוך מחשבה שתשתית זו תשרוד בכל מלחמה או אסון טבעי ותשמש את הדורות הבאים (Siösteen 1979; Ikäheimonen et al. 1989; Broch and Rygh 1976, Qvenild 2008).

גרמניה. על המנהור בתקופת הרייך השני והשלישי כבר נכתב למעלה. כאן נדגיש כי בתקופת השלטון הנאצי הוכנו מקלטים שנועדו להגן על עשרות מיליוני תושבי הערים התעשייתיות. תפיסת ההגנה הגרמנית אחרי תבוסת הנאצים יצאה מנקודת הנחה כי אין אפשרות להשיג מיגון מלא ולהכניס למקלטים במקרה הצורך את כל האוכלוסייה (יותר מ-80 מיליון נפשות), אך עם זאת נבנו מקלטים גדולים. עד היום מתוחזק מקלט ציבורי לשעת חרום בתת-קרקע של תחנת הרכבת בבון (שתפקדה כבירת גרמניה המערבית מ-1945 עד סוף שנות התשעים). המקלט אמור לקלוט בשעת חרום 4,500 איש ולספק את כל הדרוש להשרדותם למשך כשבועיים. דוגמה נוספת מבון היא בית חולים תת-קרקעי בשטח 4,000 מ"ר המיועד ל-450 מיטות.

נורווגיה. בנורווגיה הקטנה, עם אוכלוסייה של כחמישה מיליון נפשות, קיים מינהל מרכזי לתכנון התגוננות אזרחית. המקלוט קיים לרוב האוכלוסייה שמתגוררת באזורים צפופים, בדגש על הבירה אוסלו. הסטטיסטיקות של סוף המלחמה הקרה הצביעו על קיומם של כ-300,000 מקומות מקלוט ציבוריים ועל יותר משני מיליון מקלטים פרטיים. המקלטים הציבוריים נבנו בצורת מנהרות תת-קרקעיות, אם כי נשאו אופי דו-תכליתי. בעת רגיעה (רוב הזמן) הם משמשים מועדונים, מרכזי ספורט, בריכות, חניונים ומבני ציבור אחרים. ההסבה לקליטת אוכלוסייה ולמפקדות אזרחיות נעשת בהתראה של 24 שעות.

שווייץ. שלטונות שווייץ דוגלים במתן מיגון לכלל אוכלוסיית המדינה, וכל אזרח ממוגן במקלטים ציבוריים במקום מגוריו. עד ימינו שומרת שווייץ על בונקרים ומבצרים תת-קרקעיים שלמים. בעת מלחמה אמורות המנהרות הרבות של המדינה לשמש לצורכי מקלוט ולצרכים צבאיים מגוונים (Foulkes 2007).

המלחמה הקרה והאיומים שהיו גלומים בה, ובה בעת פיתוח טכנולוגיות לווייניות, סימלו את בואו של תור הזהב בתחום ניצול התת-קרקע. מתחת לפני האדמה, סמוך לערים הקיימות (אוטווה, בון, מוסקבה ואחרות) או מתחתיהן הוכשרו מיליארדי מ"ר של שטחים. במקלטים אלה הוסוו מעיני הלוויינים תעשיות ואמצעי לחימה רגישים. מלבד זאת הוכנו מקלטי ענק להתגוננות מפני נשק אטומי, ביולוגי או כימי למיליוני בני אדם. האובססיה של הירידה לתת-קרקע כמרכיב עיקרי של מיגון העורף השתלטה על שני הגושים: הקומוניסטי והמערבי (Allen 2012; Mehra 1998).

המלחמה הקרה הולידה בניית מתקנים ותשתיות תת-קרקעיות רבות ולא רק למקרה של אסון גרעיני. נציין מקרה מעניין, בו מצאו מהנדסים צבאיים שימוש בחללים תת-קרקעיים הנמצאים מתחת לפני הים. כך בסיס הצי הצבאי הסובייטי שבבלקלבה (Balaklava), שבחצי האי קרים נועד לשינוע, השהיה ותיקון צוללות מתחת לסלעים ומפלס פני הים, הרחק מאיומים ותוך הסוואה אידאלית מלווייני האויב (Brown 2003). על תשתיות אלו נודע בעקבות התפרקות ברית המועצות, אך נראה שמתקנים דומים של ברית נאט"ו לא ייחשפו בעתיד הקרוב.

במבצע צוק איתן (2014) התגלו מנהרות רבות סביב רצועת עזה (Eastler 2004; Pelham 2012), אך הפלסטינים לא המציאו את השימוש בהן לצורכי לחימה. באפגניסטן ובפקיסטן משמשות מנהרות ומערות מקום מסתור ותשתית לניהול מלחמת גרילה לכוחות אל-קאעידה (Bahmanyar 2012); מנהרות שימשו את כוחות צפון וייטנאם במאבקם נגד האמריקנים (Rottman et al. 2006); צפון קוריהא אימצה שימוש מסיבי במרחבים תת-קרקעיים למטרות צבאיות שונות: החל ממפעלי תעשייה הצבאיים, דרך מחסנים ומאגרים רבים וכלה במתקני הגרעין. נוסף על כך חפרה צפון קוריהא מנהרות רחבות במיוחד מתחת לקו הפסקת האש בינה לבין שכנתה מדרום, שאפשר להזרים בהן דיוויזיות שלמות, ארטילריה כבדה ואף טנקים (Fischer 2007).

על השימוש בתת-קרקע למטרות צבאיות נכתב בהרחבה (שי 2003). אשר לצרכים אזרחיים, האמריקנים היו הראשונים שהשכילו לנצל את יתרונות המרחב התת-קרקעי בדבר איטום, בידוד ושימור של טמפרטורות, לחצים ולחות קבועים. הם הפעילו את המקרר התעשייתי התת-קרקעי הראשון ומצאו דרך לאחסון דלקים פחמימנים בשכבות נקבוביות של גז ונפט שהידלדלו. הם בנו מאגרים תת-קרקעיים "רגילים", אך בממדים גדולים במיוחד. כך השיגו חיסכון מרבי על ידי מניעת התאדות, הנמכת סיכויי שריפה והגנה מפני השפעות חיצוניות. כבר בסוף שנות השישים של המאה הקודמת הוקמו יותר מ-95% של מכלי הגז הנוזלי בארצות הברית בתת-קרקע, וכך גם רוב העתודות האסטרטגיות של הנפט ומוצריו. המודל האמריקני אומץ על ידי רוב חברות האנרגיה בעולם ואלו הוכנסו לתקנים בין-לאומיים.

פיתוח אורבני בתת-קרקע יכול להיווצר באקלים קר כמו בקנדה, ובאקלים חם כמו במזרח התיכון, דרום אירופה ואוסטרליה (Boivin 1991; Bertini 2010; Roy 2006). ללא שום קשר לאקלים, מדובר על פיתוח מרכזים עירוניים צפופים בערים סואנות, שיקלו על קשיי התחבורה ועל המחסור בשטחי מסחר (Cui et al. 2013). יפן השקיעה מיליארדי דולרים בהכשרת מיליוני מ"ר תת-קרקעיים, בייחוד במטרופולינים טוקיו ואוסקה. באטלנטה, שיקגו ומיניאפוליס ביצעו האמריקנים תכניות צנועות יותר והרבה יותר מחושבות. מיליארדים הוקצבו גם במוסקבה, אך בשטחים משמעותיים פחות.

תוכניות מרחיקות לכת נשקלות ואף בוצעו בערי השפלה אנטוורפן ואמסטרדם. בצד ההתקדמות בתחום הרכבת התחתית, הציעו בערים הללו "להוריד" כמה רחובות מתחת לפני האדמה ולקדם תחבורה תת-קרקעית מהירה וזולה, גם בין-עירונית (Couchard and Van Bogaert 2000). ההולנדים לא היססו להוריד תחנת אוטובוסים מרכזית ומתקנים של שדות תעופה אל מתחת לפני הקרקע (Sikkel 1993; Boer 1999).

הפרק הבא יחשוף חלק מן הסוגיות החשובות ביותר שנתקלים בהם מתכננים ומהנדסים כשמדובר בתת-קרקע.

פרק ג. התת-קרקע: סיווג ומיון

בפרק זה נמיינ ונסווג מבנים שניתן למקם בתת-קרקע. מבלי להתעמק בנושאים גאולוגיים או הנדסיים מסובכים, נביא את כולם כדי לצייר תמונה מקיפה ככל האפשר של שימושים, בעיות, חסרונות ויתרונות.

סיווג בהתאם לייעוד

1. תחבורה – כל הקשור בהיבט הנייח והנייד של הענף: ביבשה, באוויר ובים. מדובר במעברי דרך תת-קרקעיים, מנהרות רכבת, מערכות רכבת תחתית, תחנות מרכזיות ומשניות של תחבורה מוטורית, תחנות דלק, סדנאות ובתי מלאכה, חניונים, מתקנים שונים של נמלי ים ושדות תעופה. מבחינה גאוגרפית ניתן אף לבדל בין תחום התחבורה הפנים-עירוני (צפוף ומורכב יותר) לבין הבין-עירוני (מורכב פחות אך לא פחות חשוב).
2. תעשייה – מבחינה היסטורית, עד השליש האחרון של המאה ה-20 היה רוב השימוש בתת-קרקע בענף של תעשיות עתירות חומרי גלם: בורות ובונקרים לשליטה על תהליכי הייצור ומרחבים ספציפיים לעיבוד חומרי גלם ואף תוצרי ביניים במפעלי פלדה, מפעלים כימיים ופטרו-כימיים. מובן שבתת-קרקע השתמשו בכלל התעשיות הקשורות במכרות או בכל הטכנולוגיות של הוצאת המחצבים ועיבודם הראשוני (מיון, ריסוק, העשרה). תעשיות ביטחוניות (סודיות בעיקר) ניצלו את יתרונות העומק כדי להתרחק ממגוון הפרעות על פני האדמה. מהפכת המחשוב והטכנולוגיות הנלוות מאפשרת למקם מתחת לפני הקרקע כמעט כל תעשייה גם כבדה וגם עתירת ידע.
3. אנרגיה – כלל התחנות או חלק מן המתחמים התת-קרקעיים בתחנות כוח ההידרואלקטריות, התרמיות והגרעיניות. במקרה האחרון הדגש הושם על מערכות קירור ועל מנהרות שמיועדות להעברת חומרי גלם, מיקום טרנספורמטורים, קבלים וכדומה.
4. אחסון – מאגרים פעילים וכן מצבורים לשעת חירום (נפט, גז, דלקים, מים, ציוד מגוון). מרחב תת-קרקעי אטום מאפשר הקמה ותחזוקה של מקררי ענק שניתן לשמור בהם לאורך זמן תוצרת חקלאית לא מעובדת ומוצרי מזון מוגמרים וחצי-מוגמרים. תת-קטגוריה חשובה נוספת של אחסנה היא מצבורי הטמנה (סופית או עתית) של פסולת מסוכנת, רדיואקטיבית, כימית או ביולוגית.
5. צרכים ציבוריים – משרדים ושטחי מסחר, מסעדות, מתקני ספורט ובידור, מוסדות דת. במקרים רבים קיים שילוב בין הבנייה הרגילה לבין זו התת-קרקעית, בדגש על חניות ותשתיות לבניינים רבי-קומות.

6. תשתיות והנדסה אזרחית – מנהרות, תעלות, בריכות, צינורות, תחנות שאיבה, מרכזי שליטה ובקרה שמיועדים לניהול שוטף ולטיפול במערכות מים, ביוב, גז, דלקים, חשמל ותקשורת.
7. בריאות – שימוש באתרים תת-קרקעיים שקטים, מבודדים, ללא זעזועים (ויברציה), בתנאי לחות קבועים, לחץ וטמפרטורות קבועים, עם השפעות מוגבלות של השדה המגנטי, היעדר בקטריות וקרינת שמש מתאים לחדרי ניתוח, למפעלי תרופות, למעבדות ולשאר מתקני בריאות, ואף לבתי הבראה הממוקמים בתוך סלעים מסוימים שמשמשים לצורכי ריפוי (למשל מערות מלח לטיפול באסתמה).
8. צרכים מדעיים – אותם היתרונות שצוינו בסעיף הקודם התאימו לשימושים אקדמיים רבים: סדנאות, מעבדות ומכונות מחקר, מאיצי חלקיקים שדורשים מנהרות תת-קרקעיות במסלול מעגלי, מנהרות אווירודינמיות, פיזיות וגאו-סיסמיות, מחשבי-על, שרתים, ארכיונים וספריות מדעיות.
9. צרכים ביטחוניים – מפעלים ומתקנים צבאיים לחילות היבשה, האוויר והים ולהגנת העורף, מקלטים, מתקני שיגור טילים, מפקדות, מטות, בסיסים, מחסני חרום (ימ"חים), מנהרות התקפיות ומנהרות שמובילות לאזורי כינוס לוחמים ליד הגבולות, ובעתיד אולי שדות תעופה.
10. תיירות – גלריות, מבוכים, מוזיאונים ואולמות בידור.
11. שימוש פרטי – ניצול מרחבים תת-קרקעיים על ידי הפרט הבודד בכל הקשור לבית מגוריו: חניה, מרתף, מקלט, מרחב למיקום גנרטור או מערכות מיזוג אוויר, קומות מגורים מתחת לפני הקרקע, מעברים לסביבה הקרובה ועוד.
12. חקלאות – השימוש החקלאי הנפוץ בתת-קרקע בעבר היה צנוע ביותר. לרוב, במכרות ישנים גידלו פטריות. ייתכן שעתיד המזון של האנושות יהיה קשור לא רק באוקיינוס אלא במכרות פחם ישנים, שימוקמו בהם חממות לכל גידול שהוא. בינתיים, החקלאות התת-קרקעית מקובלת מעבר לחוג הקוטב, באזורי קיפאון-עד (permafrost), שבהם הקרקע מפשירה בקיץ רק לעומק של סנטימטרים ספורים, אם בכלל. ברוסיה, חקלאות כזאת משתלבת במתחמי ענק של מפעלי התעשייה המקומיים: בעיר נורילסק שבסיביר, בחצי האי קולה ובקמצ'טקה. בתוך מרחבים תת-קרקעיים של המפעלים משולבות חממות לגידול ירקות ופירות המקבלות את החום ואת האור הדרוש ממערכות האנרגיה של המפעל. מערכות חקלאיות הרבה יותר מתוחכמות ויותר לכליות קיימות באלסקה ובקנדה. גם בבירת בריטניה, החמה בהרבה מאלסקה, אבל צפופה יותר, עושים ניסויים חקלאיים תת-קרקעיים מעניינים. במנהרות תת-קרקעיות בלונדון, ובייחוד במקלטים ישנים ממלחמת העולם השנייה, הקימו יזמים חווה תת-קרקעית לגידול ירקות (Merril 2014).

סיווג תכנוני (לפי צורה וממד)

- מבחינה גאומטרית-הנדסית ניתן למיין מבנים תת-קרקעיים לשלוש צורות תכנון עיקריות:
1. מנהרות או מבנים תת-קרקעיים "ארוכים" – בעלי ממד אופקי משמעותי ביותר (לעומת רוחב או גובה החתך);
 2. פירים או מנהרות אנכיות, כלומר מבנים תת-קרקעיים החפורים לעומק, כגון למעליות, לאורווה, לחימום, לניקוז ולתקשורת, ולעתים למטרות צבאיות;
 3. תאים, חדרים או מבנים תת-קרקעיים אחרים שמשתרעים בשלושת הממדים. מדובר בצורה שמתאימה לשימושים רבים.
- חשוב לציין כי במערכות תת-קרקעיות מורכבות (רציפות ורב-שכבתיות) משתמשים בשילוב של שלוש הצורות הללו. דוגמה טובה לכך היא הרכבת התחתית.

סיווג לפי מיקום

ההבחנה הבסיסית נעשית בין שני סוגי מבנים:

1. מבנים שמעליהם יש שטחים פתוחים: פארקים, גנים, יערות או שדות חקלאיים וגופי מים. במקרים אלו אין צורך להתחשב בבידוד משמעותי בין התת-קרקע לבין מה שנמצא מעל פני האדמה.
2. מבנים תת-קרקעיים הנמצאים מתחת למרחב אורבני בנוי בצפיפות, או מתחת לתשתיות הנדסיות מורכבות. במקרה הזה נחוץ קשר בין המבנים והתת-קרקע או בידוד בינו לבין מה שנמצא מעליו.

סיווג לפי השפעות אקולוגיות

ההבחנה הבסיסית היא בין שלוש קטגוריות עיקריות של מבנים:

1. מבנים שנחיצותם (הכלכלית, או הביטחונית) עולה על כל נזק אקולוגי פוטנציאלי, בשל סוגיות מיקום ואיתור ספציפיים המצביעים על אתר גאוגרפי כלשהו (מרחבים תת-קרקעיים הנמצאים במרחק אופטימלי מהיעדים שעליהם לשרת, כגון מחסנים, תחנות חשמל ומאגרי מים). בדרך כלל דובר באתרים סודיים, מוסווים ומוגנים היטב מכל איום. במקרים אלה לא תוכננה שום אינטגרציה בין תכנית הקרקע, הצומח והחי שבה, לבין מה שתוכנן להקים מתחתיה. דוגמה למבנים מסוג זה: תשתיות תחבורתיות בעלי חשיבות עליונה, אתרים צבאיים ותעשייתיים סודיים.

2. מבנים לא סודיים ולא מוסווים, שממוקמים מתוך התחשבות בהשפעותיהם האקולוגיות הצפויות. במקרים כאלה נערכים מראש להתפתחויות לא רצויות ופועלים להקטנת הסיכוי של מטרד או אפילו אסון אקולוגי פוטנציאלי. עם המבנים מהסוג הזה נמנים תחנות כוח גרעיניות, מאגרים לאחסון זמני או הטמנה סופית של פסולת, חומרים ביולוגיים, כימיים או רדיואקטיביים מסוכנים.
3. מבנים אקולוגיים – פרויקטים תת-קרקעיים שתוכננו כירוקים לפי הגדרתם ושנועדו לשפר את איכות הסביבה: מערכות חימום, קירור, מערכות אוורור לא מזהמות, תשתיות של אנרגיה ירוקה וכדומה.

סיווג לפי מאפיינים גאולוגיים-הנדסיים

לפי מיון זה מתחשבים בשפע מאפיינים טכניים וגאולוגיים ייחודיים שמיותר לפרט כאן בשל מורכבותם. נציין אותם בקצרה:

1. עומקים תכנוניים שונים של אובייקטים התת-קרקעיים. ככל שגדל העומק, גדלה המורכבות ההנדסית והלוגיסטית.
2. שטח החתך (או רוחב החתך), יכול לנוע בתווך שבין מטרים ספורים לאלפי מטרים. ככל שהרוחב גדול יותר, כך בהתאם לסוג הסלע נדרשים פתרונות הנדסיים ולוגיסטיים מתוחכמים ויקרים יותר.
3. הטופוגרפיה; סוגי מסלע (משקע, וולקני, מטמורפי), דרגות קושייות שונות (רך, קשה) ואלפי חלוקות משנה וסוגים בהתאם לצפיפות, חוזק, סידוק, נקבוביות וחדירות (ובהתאם יכולת ספיגה או העברה של מים ונוזלים אחרים דרכם, התנהגות כימית ופיזית); התבליט (הרים, שפלה, קניון) – חשוב ביותר בכל הקשור לבנייה בשיפוע; התכסית (יערות, שדות, גופי מים) שבה או מתחתיה יבוצעו העבודות. ההבחנות המדויקות יסייעו בהתאמת מיכון, סוגי תמך ודיפון, פתרונות ניקוז, אוורור וכדומה. חשוב להדגיש את השפעתו ההכרחית של סוג המסלע: במקרה של גבול עם מדינה עוינת, סוג המסלע הוא הקובע את מידת הקושי לחפור מנהרות.
4. סוג העבודות התת-קרקעיות או אלו המשולבות:
 - חפירה פתוחה (ואחריה בניית תומכות ולאחר מכן כיסוי בקרקע – תעלה מכוסה או מתחם שלם מכוסה). מתאים למבנים בעומקים לא רבים. מדובר בטכנולוגיות פשוטות יחסית, שלא דורשות מיכון ייחודי. השימוש בה נעשה לשם הקמת קווי ביוב, מעברי הולכי רגל, או מנהרות לא עמוקות. שיטות הכרייה המסורתיות הללו נקראות cut-and-cover.
 - חפירה סגורה (מבלי לפגוע בתכסית שעל פני האדמה) – נעשית ברוב המנהרות ובמתקנים סודיים בעומק הסלעים. חפירה מסוג זה מצריכה מיכון ייחודי ואורכת זמן רב, אבל יש בה

יתרונות רבים ובהם מקדמי בטיחות גבוהים ויכולת להשתמש במבנים שנבנים בטכנולוגיה זו לצורכי מקלטים שונים. שיטה חדשה המקובלת בסוג חפירה זה היא TBM (Tunnel Boring Machine) – מכונת כרייה ייעודית דמוית גליל שמפנה את העפר תוך כדי כרייה ומדפנת את הקירות.

- שיטות מורכבות המיועדות לעבודות ספציפיות: הזזת סלעים, דחיסתם ודחיקתם, פיצוץ מבוקר, קידוח ושימוש במרכיבים כימיים שונים.

חשוב להדגיש כי הבקיאות בשיטות החפירה נחוצה לא רק לשם הקמת מבנים תת-קרקעיים, אלא גם להתגוננות נגד חפירת מנהרות טרוו. המומחים בתחום מסוגלים לזהות חפירה בעת הכנתה לפי סימני היכר שמשאירות טכנולוגיות שונות.

סיווג לפי מבנים תת-קרקעיים נפוצים בעולם

1. מכרות – מערכת מבנים תעשייתיים שהוקמו במטרה להוציא מתחת לפני הקרקע חומרים בעלי ערך. זהו מכלול של ביתנים ומכונות הפעילים מתחת לפני האדמה ומעליהם כבר מאות שנים (עד תום הניצול של המשאב שמפיקים) בתבליט מגוון. בתום השימוש בהם נשאר שפע של חללים תת-קרקעיים שניתנים להסבה למטרות שונות.
2. מנהרות של מסילות ברזל ושל תחבורה מוטורית – מנהרות כאלו תורמות לרציפות הנתיבים ולהגנתם מפני איומים שונים. חשיבותן עולה באזורים בעלי טופוגרפיה מסובכת או אקלים קשה, או בכאלה שנתונים בסכסוכים כלכליים (למשל, זכות הקניין על הקרקע) או גאופוליטיים – ביטחוניים (היעדר הסכמה על ריבונות השטח או על רציפותו).² אולם גם מבלי להרחיק לכת, מנהרות מסוג זה נחוצות לצורכי התייעלות של התשתיות השונות. ממדיהן הגדולים יחסית מאפשרים לקיים כמה מפלסים בשני הכיוונים ושפע של מסלולים (עד שמונה).
3. רכבת תחתית – אין בעולם מערכת משולבת שכה מיטיבה עם הערים שהיא משרתת, אולם גם קשה למצוא מערכת יקרה ממנה. על כן בעשרות השנים האחרונות אפילו בערים בעלות ניסיון רב בתחום (למשל מוסקבה), מעדיפים להקים מקטעים של הרכבת התחתית על פני הקרקע. הקושי במינהור בערים גדל והולך בגלל שימוש קודם בתת-קרקע לצורכי ביוב, מים, תקשורת, חשמל ומערכות הובלה קודמות.

2 תכנית למנהרה של כ-48 ק"מ בין הגדה המערבית של הירדן לעזה, שתישאר בריבונות ישראלית אך תנוהל על ידי הפלסטינים, היא דוגמה מעניינת לתופעה זו, אם כי כיום קשה לדמיין כיצד מיזם כזה קורם עור וגידים (קוריאל 2009).

4. קטקומבות – כל מעבר תת-קרקעי, טבעי או מעשה ידי אדם שנמצא בתת-קרקע, בעיקר מתחת לערים. לרוב אלה שרידי מחצבות ובתי קברות. הקטקומבות הידועות ביותר נמצאות בפריז, בטרייר שבגרמניה, ברומא, בפלרמו, ובערים שונות בבריטניה ובצפון אפריקה.
5. מקלטים – פתרונות הגנתיים במגוון טכנולוגיות אדריכליות שנבנו לאורך הדורות. המקלטים התת-קרקעיים המודרניים הם הרבה יותר מרווחים ומשולבים בתוך מבנים. בזמן רגיעה ניתן לעשות בהם שימוש חלופי, ממועדוני נוער ותרבות ועד מחסנים וחניונים. אלפי מקלטים פרטיים וציבוריים בישראל מדגימים זאת.

סיווג משולב

המיון שיוצג להלן בטבלאות 2-5 יסכם את נושא הסיווגים לפי התחומים הבאים:

1. חפירה/כרייה/מנהור יזומים ייעודיים
2. הסבה או שינוי ייעוד של אובייקטים תת-קרקעיים מעשי ידי אדם קיימים או התאמה של חללים תת-קרקעיים טבעיים
3. שימוש במבנים גאולוגיים נקבוביים (שכבות סלע שהידלדלו מנפט, גז או מים)
4. שילוב של שלושת הסעיפים הקודמים, בדגש על השניים הראשונים

טבלה 2: חפירה, כרייה או מנהור יזומים וייעודיים

פירוט השימוש במבנים	צורת המבנה או סוג החפירה	ייעוד עיקרי של מבנה תת-קרקעי
מכרות	מנהרות כרייה ותשתיות נלוות	הפקת מחצבים
תחנות כוח (הידרואלקטריות, תרמיות, גרעיניות)	מנהרות, תעלות מכוסות	פתרונות תחבורתיים
מאגרי מים, מפעלים לטיפול במי קולחין	חדרים, מנהרות	אספקת חשמל
מרכזים מסחריים, תחנות תחבורה ציבורית, חניונים, מחלפים, מעברים להולכי רגל, אתרי בידור, תרבות וספורט	חדרים, מנהרות, תעלות מכוסות, חדרים	אספקת מים וטיפול בביוב
מטות, מפקדות, מקלטים, בסיסים, ימ"חים ומחסנים אחרים, מתחמי שיגור טילים, מנהרות התקפיות	חדרים, אולמות, מנהרות, תעלות מכוסות, פירים	פיתוח עירוני
		ביטחון לאומי

טבלה 3: הסבה או שינוי ייעוד של אובייקטים תת-קרקעיים מעשה ידי אדם או התאמה של חללים תת-קרקעיים טבעיים

פירוט השימוש במבנים	צורת המבנה או סוג החפירה	ייעוד עיקרי של מבנה תת-קרקעי
מפעליי יינות, חוות לגידול פטריות וירקות, חוות עופות, מפעלים לעיבוד הראשוני או המוגמר של התוצרת (מפעלי שימורים, עיבוד בשר וירקות)	מכרות שלא בשימוש	חקלאות ומפעלי מזון
מאגרים ומחסנים של תוצרת חקלאית, תעשייתית וכן של נוזלים מגוונים; מקרים	מערכות הגנה שננטשו; חפירות או מחצבות לשעבר בסלעי גיר, גבס, מלח, או בשכבות הפרופרוסט; לעתים שכבות גרניט	אחסון ואגירה
בתי חולים ובתי הבראה, מעבדות	מערות מלח, מערות קרסטיות	בריאות
מערכות תיירותיות משולבות	מערות, מנהרות ומבוכים	תיירות
מנהרות תקיפה	מנהרות וסדקים קרסטיים שעברו תהליך של המסה (ולאחר מכן הורחבו והותאמו באופן מלאכותי)	צרכים צבאיים

טבלה 4: שימוש במבנים גאולוגיים נקבוביים (שכבות סלע שהידלדלו מנפט, גז או מים)

פירוט השימוש במבנים	צורת המבנה או סוג החפירה	ייעוד עיקרי של מבנה תת-קרקעי
מאגרי נפט, גז טבעי, מוצרי נפט, גז טבעי נוזלי	שכבות גז ונפט מדולדלים, אקוויפרים, מכרות שלא בשימוש	אחסון מחצבים (נוזלים וגזים)
אתרי הטמנה ומאגרים עתיים של פסולת ביתית ותעשייתית, אורגנית או גרעינית ³	מכרות שלא בשימוש, קידוחים ישנים בכל שכבות הסלע שניתן לאטום אחרי החדרת החומרים לתוכם; שכבות סלע בעלי נקבוביות גבוהה אבל חדירות נמוכה: שכבות מלח, חרסיות	הטמנת חומרים מסוכנים, לא רצויים או מזהמים

טבלה 5: שילוב של פרויקטים ייעודים עם אלה הטבעיים

פירוט השימוש במבנים	צורת המבנה או סוג החפירה	ייעוד עיקרי של מבנה תת-קרקעי
מפעלים ליצור אלקטרוניקה ואופטיקה מדויקת, תעשיות רכב, מיכון מתקדם, תעשיות ביטחוניות	חדרים גדולים, מנהרות, תעלות מכוסות, פירים	מיקום תעשיות
מאיצי חלקיקים בתוך מכוני מחקר גרעיניים; מעבדות שחייבות להיות מרוחקות ומוגנות מקרינה, כגון אלו לחקר תכונות ניטרינו; מעבדות סיסמיות וגאופיזיות	חדרים בתוך מכרות עמוקות (עד 1.5-2 ק"מ), מנהרות במסלול מעגלי	צרכים מדעיים

3 לאחרונה נעשו ניסיונות להחדיר לקרקע דו-תחמוצת פחמן כחלק מהמאבק בגזי החממה (Damen et al. 2006; Holloway 2005).

פרק ד. התת-קרקע בישראל

הטכנולוגיות של היום מאפשרות להכניס לתת-קרקע כמעט הכול: מאגרי מים, נפט, גז, דלקים, מחסנים, כבישים ומעברים, מרכזי בקרה של תשתיות חיוניות, החל מגז, מים וביוב וכלה בחשמל ותקשורת. אולי נחוץ מהפך מחשבתי שיביא להבנה כי זה אכן אפשרי ואולי גם זול יותר. נתחיל בהדגמה של מקרה אמיתי.

מקרה "ארנב". ארנב הוא מתקן בריטי לאחסון נשק ותחמושת (לא נציין את מיקומו המדויק) שהוקם בארץ ישראל בשנת 1940. ישראל אחסנה בו חומרי נפץ מאז סיום המנדט (1948) ועד שנת 2013. שטח המתקן הוא כ-2,500 דונם. סביב ארנב ממוקמים חמישה יישובים עירוניים וכמה יישובים כפריים. חלקם נבנו פחות או יותר בעת הקמת המתקן, אחרים זחלו והתקרבו אליו, כפי שקורה בארץ צפופה.

עקב חוקי בטיחות חל איסור לבנות ברדיוס של 1,500 מ' ממקום האחסון, כך שהשטח האסור בשימוש אזרחי מסתכם ב-2,500 דונם של המתקן עצמו + 7,065 דונם של השטח כפונקציה של הרדיוס. תרגיל מתמטי פשוט מביא למסקנה, שכ-10,000 דונם אסורים לשימוש. זהו שטח גדול למדי, היכול לשמש להקמת עיר קטנה בקנה מידה ישראלי.

עם הורדת המתקן לתת-קרקע התפנו רוב השטחים האסורים בבנייה. שטח זה משמש להרחבת חמשת היישובים העירוניים (חלקם אוחדו לעיר אחת) ועדיין נותרו חלקות להרחבת שטחי היישובים הכפריים. מחיר הורדת המתקן לתת-קרקע עלה כ-200 מיליון שקל, ואילו התמורה שקיבל מינהל מקרקעי ישראל ממכירת הקרקע (10,000 ד') הייתה כ-600 מיליון שקל! זהו מקרה של win-win situation: יש כאן רווח כלכלי, סביבתי, אורבני וחקלאי, מה גם שצה"ל זכה במתקן מודרני וחסכוני בהפעלתו.

היתרונות של השימוש בתת-קרקע למערכת הביטחון מובנים, ובראשם העלאת רמת הבטיחות מכל סוגי האיומים הביטחוניים, לרבות בטיחות לתושבי הסביבה ממתקני צה"ל עצמם. יתרונות אזרחיים הם שיקולי נדל"ן ותשלומי המסים לרשויות, וכן חיסכון ניכר בתקציבי מערכת הביטחון, שכן השמירה על מתקנים תת-קרקעיים זולה ויעילה יותר מהשמירה על מתקנים שעל פני האדמה. בהקשר זה נזכיר מתקנים צבאיים שהציבור יודע עליהם: בהר כנען, בקריה בתל אביב, בחרמון, בשדות תעופה, ויש רינונים על מרתפים הנבנים עבור ראש הממשלה באזור ירושלים.

בארץ בוצעו כמה וכמה פרויקטים שהשתמשו ביתרונות הבנייה התת-קרקעית, רובם מנהרות תחבורה. המנהרה הראשונה היא מימי המנדט, מנהרת הרכבת בראש הנקרה (1940). אחריה נבנו

הכרמלית בחיפה (1956), מנהרת גילה משנות התשעים בין ירושלים לגוש עציון, מנהרות הכרמל מחוף הכרמל לצומת הצ'ק-פוסט בחיפה (בביצוע של חברה מסין ושל פועלים סינים) ועשרות מנהרות של כבישים ומסילות ברזל.

חלקים מהמוביל הארצי (אלה החשובים ביותר) נמצאים מתחת לפני הקרקע. בתוואי של תעלת הימים, שלא יצאה לפועל, תוכננו ואף נחפרו מנהרות למעבר מתחת להרי יהודה. גם בתחום המאגרים והמכלים השתמשו בתת-קרקע. לדוגמה, מכלי הדלק הגדולים מדרום לבאר שבע. מנהרות לאחסון חומרים חיוניים נחפרו ליד שער הגיא.

בעשור האחרון נחפרו מנהרות תשתית רבות (בעיקר ניקוז, ביוב וחשמל) באורך כולל של עשרות קילומטרים, ובמקרה של מנהרות של כבלי חשמל – מאות. צורכי המיגון שנהיו דחופים אחרי מלחמת לבנון השנייה דחפו לחפירת מקלטים או מרחבים תת-קרקעיים כאלה או אחרים בבתי החולים השונים. לאחר מבצע צוק איתן הדחיפה למנהור שוב צוברת תאוצה. מכל מקום, השיקולים של ירידה לתת-קרקע אינם קלים.

עלות בנייתו של בית החולים התת-קרקעי לרפואת חרום על שם סמי עופר (שנבנה מתחת לבית החולים רמב"ם בחיפה) הוערכה ב-800 מיליון דולר (פטרסבורג 2012). מבחינת השטח דובר בחניון תת-קרקעי בעומק של שלוש קומות, עם קיבולת של 1,500 מכוניות, שיהפוך להיות בית חולים ובו 2,000 מיטות, אם ישראל תותקף או בשל אסון אחר. המיקום אינו קל לעבודה: שכונת מגורים ליד חוף הים, שבו עומק הבנייה המרבי מגיע מתחת למפלס פני הים (כ-18 מ' עומק), מתקנים צבאיים שמשיקים למבני בית החולים וכביש מרכזי העובר בקרבתו. חשוב להדגיש, כי דובר אך ורק בתוספת לבית חולים הקיים, שמיועדת לתפקד כחניון, ורק במקרה חרום יועתקו למתחם התת-קרקעי חלק ממחלקותיו העיליות. כדי לקבל מושג עד כמה המיזם יקר, נביא את הנתון הבא. עלות הקמת בית החולים החדש באשדוד מוערכת ב-650 מיליון שקלים (ולא דולרים!). דובר במתחם של עשר קומות שיכלול עשרות מחלקות וכ-300 מיטות אשפוז תקניות (במקרה הצורך אפשר להכפיל את הממד הזה). שטחו יתפרס על 70 דונמים וימוגן מפני פגיעת טילים (מזורי 2012).

עלות הרכבת הקלה בגוש דן, שכוללת שתי מנהרות תת-קרקעיות באורך של 13 ק"מ, מוערכת ב-3 מיליארד שקלים (במחירי 2013), ללא בניית עשר תחנות המעטפת ("קופסאות") (בר-אלי 2013). במוסקבה הבזבזנית, עלות קילומטר אחד של מנהרה אחת לרכבת התחתית בשיטה של חפירה וכיסוי היא כ-46 מיליון דולר; בשיטה המתקדמת של מנהור, העלויות כפולות. יתר על כן, את הסכומים שצוינו יש לפחות להכפיל, שכן רכבת תחתית חייבת שיהיו לה שני נתיבים מנוגדים, כלומר שתי מנהרות. על מנת לתת בסיס השוואה ליוקר מסילת הרכבת התת-קרקעית, ניתן להשתמש בנתון הבא: כ-20 ק"מ של מסילה חד-מסלולית עילית מקריית מוצקין לנהריה עלו כ-662 מיליון

ש"ח (כ-33 מיליון שקל לקילומטר, כולל, שדרוג המסילה הישנה ושינויים בתחנות הרכבת בעכו ובנהריה) (Ynet 24.11.2013).

עלות בניית המנהרה באורך 8.5 ק"מ ובקוטר 2.2 מ' להולכת השפכים של גוש דן היא 650 מיליון שקל. גורמים אחדים מקשים על העבודה: חפירת המנהרה מתחת לתשתית קיימת, ציוד מתוחכם ויקר (המחיר של כל מכונה במטבע של אירו נע בין מיליון ל-4 מיליון), קשיים לוגיסטיים והיערכות מיוחדת של חפירה בחוף הים והימנעות מנזקים לכביש שמעליה (חסון 2013). גם ללא נזקים לכבישים או למערכות אחרות, מחיר מנהרות התשתית הוא עצום. למשל, כחלק מפרויקט מערכת המים החמישית לירושלים תחפור חברת מקורות מנהרה באורך 14 ק"מ ובעומק של עד 350 מ' בעלות של מיליארד שקלים (יצחק 2009; רשות המים 2011).

עלות מנהרות הכרמל הסתכמה ב-1.25 מיליארד שקל. אמנם במנהרה עובר כביש אגרה, והיזמים אמורים להחזיר את השקעותיהם ואף להרוויח, אך גם לתקציב הציבורי עלה המיזם הון רב. התוואי הכולל של המנהרות הוא כ-6 ק"מ, כך שבחשבון גם, קילומטר אחד עלה כ-208 מיליון שקל. כדי לדמיין את גודל ההשקעה אפשר לעשות השוואה עם כביש 7, שחשיבותו אמנם פחותה מזו של המנהרות המשרתות את חיפה רבתי, אבל בהכרחיותו האסטרטגית אין לזלזל. שבעה הקילומטרים שלו מקשרים את הכבישים 6 (חוצה ישראל) ו-3 עם כבישי מישור החוף. עלותו הגיעה לכ-110 מיליון שקל.

בסוף שנת 2002 דווח כי רק עלות החציבה של ה"בור" של ראש הממשלה (קומפלקס ובו משרדים וחדרי ישיבות, המאפשר לממשלה לנהל את המדינה במצבים קיצוניים) הוערכה ב-500 מיליון שקל (Ynet 7.12.2003). קשה למצוא דוגמה מקבילה לכך למבנה הנמצא מעל הקרקע.

המסקנה ברורה: טכנולוגיית הבנייה התת-קרקעית עדיין יקרה. שום תקציב לא יוכל לעמוד בעלויות, מה גם שהתועלת הממשית טרם הוכחה. ברור גם שאין לצפות שיזמים פרטיים יהיו מוכנים לשאת על כתפיהם את המשימה של פיתוח התת-קרקע, בעיקר בכל הקשור בתחומים האסטרטגיים. לנוכח תמונה פסימית זו נזכיר את מקרה "ארנב" ונצביע על היתרונות הכלכליים של הירידה אל התת-קרקע. המרחבים שייבנו בתת-קרקע יצילו רבבות דונמים של יערות, פארקים, גנים, שמורות, שטחים פתוחים וריאות ירוקות בערים. במקרה הספציפי של האקלים הישראלי ושינויי האפשריים (סופר וברקובסקי 2012), הירידה אל מתחת לפני האדמה מתבקשת.

לישראל מגוון יתרונות שיקלו על פיתוח התת-קרקע או ישמשו מאיץ לניצולה: ריבוי סלעי משקע, תבליט הררי לא מועט שמאפשר התחפרות בקנה מידה גדול ובעלת מקדמי הגנה גבוהים (לא בחפירה ובכיסוי אלא בחדירה לעומק), ומחצבות פתוחות נטושות שניתן להשתמש בהן. קיימות

מערכות תת-קרקעיות היסטוריות, שאמנם קשה למצוא להן שימוש במתכונתן הנוכחי, אך את חלקן אפשר להסב למטרות מיגון, אגירה, אחסון, שלא לדבר על חניונים ועל אתרי תיירות. יש מנהרות באזור תענן, במישור רותם, בעין זיק (בנגב), במצוקי מנרה (בגליל), במעלה עצמאות. מהתקופה העות'מנית נותרה מנהרת רכבת נטושה בשכם, בראש הנקרה ובראש פינה.

לצד ציון היתרונות של פיתוח תחום התת-קרקע, יש להצביע על קשיים ועל בעיות שיתעוררו במהלכו ובעקבותיו, בעיקר בשתי קטגוריות עיקריות:

1. קשיים גאולוגיים-הנדסיים-טכניים. רוב רובה של הארץ בנוי מסלעי משקע הנוחים להתחפרות, שהתנהגותם ומאפייניהם ידועים היטב מדעית והנדסית. באזורים של העתקים ושברים גאולוגיים ובאזורים הלא יציבים של מישור החוף הישראלי, הבנוי בעיקר מחולות (מאשקלון עד נהריה), הבנייה אפשרית, אבל יהיה צורך בתכנון פרטני לגבי כל אתר ואולי בפתרונות טכנולוגיים שונים לביסוס היסודות. בעיה נוספת היא קשיי ניקוז במקרה של בנייה תת-קרקעית מסיבית וסכנות הצפה הנובעות מכך. הפינוי של תוצרי החפירה במקרה של הוצאת מיליוני טונות של סלעים ידרוש פתרונות לוגיסטיים והנדסיים כהובלה, אתרי אחסון, מיון, העשרה, הטמנה ומכירה.

2. קשיים סביבתיים ובריאותיים. ייתכנו פגיעה במערכי החידור והחלחול של מים לסלעים או דרכם והשפעה לא רצויה על הזנת האקוויפרים; פגיעה באקוויפרים הקיימים, כגון זיהומם. פגיעה אקולוגית בצומח ובחי ובשטחים פתוחים (בדגש על המרחבים שיתבצע בהם הקשר הישיר בין הקרקע למה שמתרחש בתוכה: בורות או פירים של אזור, פליטה, מערכי התחבורה המקשרים ועוד). תיווצר בעיה של נטרול השפעות הגזים הרעילים (רדון) או מזהמים שונים (דלקים וממיסים) שעלולים לחדור לתת-קרקע בשל הפעילות התעשייתית הסמוכה (שטחי תע"ש, תחנות דלק, מפעלים, מוסכים) או אתרי ההטמנה השונים. כמו כן, יש להביא בחשבון את בעיית האור והאוויר של מי שישכנו או יהיו במתחמים התת-קרקעיים.

פרק ה. המינהור אצל שכנינו

אין כל סוד בכך שבאיראן חבויים חלקים עיקריים של מתקני הגרעין שלה עמוק מתחת להרים. בסוריה הוחבא במעמקים, עד שנחשף לאחרונה, נשק כימי ואחר שלה. לבנון כולה חפורה – למדנו זאת במלחמת לבנון השנייה. מפרסומים שונים אנו למדים על ממדי ההתחפרות של ארגון החיזבאללה במדינה זו גם בהווה. יש רמזים לכך שנעשים מאמצים לחפור מתחת לגדר ההפרדה בין ישראל ליהודה ושומרון. כל אלה בדלי מידע. על עזה אנו יודעים הרבה, ובמנהרות של עזה יעסוק התת-פרק הבא.

המנהרות בעזה – מקרה מבחן לשימוש אסטרטגי בתת-קרקע

רצועת עזה תחת שלטונו של חמאס היא דוגמה אידאלית להמחשת החשיבות של שיטת המינהור למימוש מטרות גאואסטרטגיות – כלכליות וצבאיות גם יחד. לפני שניגש לתיאור התופעה, הקשריה והשלכותיה, נציג בקצרה את מאפייניו העיקריים של האזור שהובילו לשימוש כה נרחב במרחבים תת-קרקעיים.

רצועת עזה היא מובלעת, אזור שאינו מחובר לארץ האם שלו (הרשות הפלסטינית שבגדה המערבית של הירדן). כתוצאה מכך סובלת עזה מבעיות האופייניות לכל מובלעת בעולם: בעיות שלטוניות (הקושי בניהול הפוליטי של האזור בשל הנתק הממשי מהממשל המרכזי), כלכליות (קושי באספקת חומרי גלם, מקורות אנרגיה ומוצרים מוגמרים), תחבורתיות (סוגיות חציית הגבולות, אשרות כניסה ופיקוח על כל מה שנכנס או יוצא מהאזור, אפילו לתוך ארץ האם ומתוכה דרך מדינה שלישית).

עזה כיום אינה נשמעת להוראות הבאות מרמאללה ומשתמשת במנגנונים שלטוניים וכלכליים משלה, אם כי ניזונה מהתקציב הפלסטיני המשותף שנועד למשכורות של מורים, רופאים וכדומה. מבחינה דמוגרפית, הישות הנקראת עזה היא מן הצפופות בעולם, והיא אינה מסוגלת לספק את צורכי האוכלוסייה ההולכת וגדלה שלה, מה גם שהיא נמצאת במצב של מלחמה מתמשכת מול ישראל, עם הפסקות אש קצרות יותר וקצרות פחות. עזה אינה זוכה בתמיכה אוטומטית של שכנתה הערבית מצרים. בקהיר רואים בדרך כלל בממשל העזתי ואף באוכלוסיית המובלעת סכנה גאופוליטית וכלכלית לביטחונה הלאומי של מצרים, בדגש על המצב הכלכלי-חברתי-פוליטי הפגיע ממלא של חצי האי סיני ושל אוכלוסייתו.

כבר שנים רבות שעזה אינה יכולה להשתמש בנמל הים שלה. אין תנועה אווירית חופשית מעליה, ואין נמלי תעופה פעילים ברשותה. היא מוקפת יבשתית במצרים ובישראל, שלא מעוניינות בהצטיידותה הבלתי מבוקרת בנשק ובדלק לסוגיו, בחומרי גלם ובמוצרים אחרים שניתן להסיבם בקלות לשימוש

צבאי. קל אפוא לשייך לעזה את התג של קורבן (Hasson 2010; Pelham 2012). אולם, ללא שום קשר ליריבות הגלויה, המאבק הפוליטי, האידאולוגי והתעמולתי, ישראל סיפקה בעבר ומספקת כיום לעזה את כל הדרוש לניהול חיים אזרחיים תקינים בה. דרך מעברי הגבול הרשמיים ובדרכים חוקיות אחרות עוברת אספקה שוטפת: מים, חשמל ודלקים, מוצרי מזון ותרופות, חומרי בנייה, מוצרי תעשייה כימית, מיכון הנדסי כבד, ואף מוצרי יוקרה ומותרות. בחלק מן המקרים, מחירי חומרי הגלם והמוצרים המוגמרים שמסופקים לעזה נמוכים משמעותית מאלו שמשלם עבור אותם הדברים הצרכן הישראלי. גם במעברי הגבול המצריים התבצעה תנועת סחורות ואנשים, בהתאם לחוק המצרי ולהתחייבויותיה הכלכליות והגאופוליטיות הבינלאומיות של מצרים.

חרף זאת, הפיקוח ההולך ומתהדק של מצרים וזה ההדוק של ישראל על כל הנכנס והיוצא מעזה ולעזה לא איפשרו חופש כלכלי-פיננסי-פוליטי לממשל החמאס והקשו על המאמץ המלחמתי של ארגוני הטרור העזתיים נגד ישראל. אוויר, ים ויבשה חסומים הם שהובילו את עזה אל מתחת לפני הקרקע. השימוש הנרחב בתת-קרקע הפך לסימן ההיכר שלה בעולם כולו. זה כעשור שהמנהרות של עזה לא יורדות מכותרות התקשורת העולמית, ואף זוכות למחקרים אקדמיים (Lichtenwald and Perri 2013; Verini 2012).

כאן יש לציין, כי "מנהרות", בכל הנוגע לעזה, הוא ביטוי כללי מדי. למעשה מדובר בשפע ובמגוון של מבנים תת-קרקעיים, שתוכננו ונבנו באופן שונה, באזורים שונים, בידי כוחות שונים ולמטרות שונות. מבלי להיכנס לפירוט דקדקני ומסובך מדי, ניתן למיין את מנהרות הרצועה לכמה סוגים עיקריים.

1. מנהרות הברחה. חלקן נמצאות ב"בעלות פרטית" של משפחות או של ארגונים שונים ובהם ארגוני פשע שמבריחים סמים, בני אדם ואף כספים (מתורמים ומשקיעים שונים). אחרות הן בבעלות חמאס, וגם הן נועדו להעברה בלתי חוקית של אנשים, סחורות ואמצעי לחימה (החל מנשק קל ותחמושת וכלה בחלקי טילים). מנהרות הברחה נחפרו מתחת לגבול עזה-מצרים ועוברות מתחת לציר פילדלפי, בעיקר בגבול המוניציפלי של העיר רפיח. עומקן הממוצע נע סביב 15 מ', אם כי התגלו מנהרות בעומק 30 מ' ואף יותר. אשר לרוחב, ככל שהמנהרה רחבה וגבוהה יותר, כך מתאפשרת הברחה יעילה יותר של פריטים גדולים יותר, לרבות מכוניות וציוד מכני הנדסי כבד בשלמותו. בדרך כלל מדובר בתכנון יעיל של מנהרות ישרות, ללא תוספות והרחבות מיותרות.

מלבד החשיבות הלוגיסטית-צבאית של אספקת מיכון ואמל"ח, המנהרות הן עסק כלכלי אזרחי יותר מאספקת מוצרים דומים דרך ישראל בדרכים המקובלות (שכטר 2014), אפילו אחרי ניכוי

מסים שהלכו לקופתו של חמאס (כ-20% ולפעמים יותר מערך הסחורות שעברו לעזה דרך המנהרות). כדאיות כלכלית זו נבעה מהעובדה שמצרים סבסדה את מוצרי היסוד לאזרחיה, ובהם קמח ודלק. מוצרים אלה שנועדו לתושבי חצי האי סיני הוברחו לעזה. הדבר הביא למחסור במוצרי יסוד בחצי האי ולהבעת חוסר שביעות רצון בקרב אוכלוסייתו, להפסדים כלכליים למצרים, להתעשרות המבריחים ולרווחי ענק של חמאס והנהגתו.

על תרומת המנהרות לכלכלת עזה, השחורה והרשמית, אין הסכמה. האספקה מסיני הגיעה כנראה ליותר מחצי (לפי אומדנים שונים עד 90%) במדד של היקף הסחורות במובלעת, והסתכמה במאות מיליוני דולרים בשנה. מספר בני האדם שהועסקו בתחום והתפרנסו מתעשיית ההברחה הגיע ללא פחות מ-70 אלף (מהם רק כ-10% עסקו בחציבת המנהרות). אולם התלות שנוצרה בעזה עקב הסחר הלא חוקי הובילה בסופו של דבר למשברים כלכליים וגאופוליטיים, כפי שיפורט בהמשך (Kershner 2014).

2. מנהרות לחימה – מכלול של מבנים תת-קרקעיים שנבנו על ידי חמאס או בחסותו למטרות אסטרטגיות וטקטיות שונות ונועדו לפגוע בישראל או להתגונן מפני תגובה צבאית ישראלית. את מנהרות הלחימה ניתן לחלק לכמה סוגים, אך לרוב מדובר בשילוב שלהם.

- מנהרות תקיפה שנבנו מתחת לקו הגבול עם ישראל. מטרותיהן העיקריות – להעביר לוחמי חמאס לשטח ישראל לשם ביצוע פעולות טרור, חבלה, חטיפה וכדומה. מנהרות מסוג זה יכולות להגיע לעומק של יותר מ-30 מ', אך בעיקר הן ארוכות (של יותר מ-1.5 ק"מ). פתחי הכניסה והיציאה שלהן עשויים להיות הרחק מהגבול. ככל שהמנהרה עמוקה יותר, כך קשה לאתרה וקל יותר לבצע בה פעילות. יצוין שחטיפת גלעד שליט אחרי פיגוע משולב ב-2006 אירעה מתוך מנהרה שאורכה היה רק כ-100 מ' מתחת לשטח ישראלי ופתחה היה בסמוך למעבר כרם שלום. בשנים 2013-2014 התגלו מנהרות שהצליחו לחדור ל-300 מ' ואף 700 מ' לעומק ישראל, והן כנראה לא היחידות. יש להניח שקיים פוטנציאל פגיעה אפילו מעבר לשטחי הקיבוצים עין השלושה, סופה, נחל עוז, בארי ונירים. חלק ממנהרות התקיפה הן "מנהרות מלכודת" – משמשות לשם הנחת מטענים ופגיעה במערכות ההגנה בגבול או בכוח האדם של צה"ל. כלומר השימוש בהן אינו מחייב את שהות המחבלים בתוכן.

- מנהרות שנבנו בתוך הרצועה ונועדו בעיקר לצורכי פנים של מערך הלחימה. חלקן משמשות למטרות לוגיסטיות – מחסני תחמושת, נשק, טילים, דלק וכדומה. אחרות מתפקדות כצירי תחבורה וקשר בין אזורי הרצועה השונים. חשיבותן תהיה מכרעת במקרה של כיבוש של עזה וביתורה לתת-אזורים. מנהרות אלו הן כלי יעיל לגיוס ולהעברת כוחות, מטענים וכספים. במנהרות אחרות נמצא אתרי מסתור ושהייה, שתוכננו לתקופות

הימצאות ממושכות או קצרות, וכן מרכזי הפיקוד והקשר עם כל התשתיות הנלוות (צבאיות ואזרחיות). גם בתוך הרצועה יש שפע של "מנהרת מלכודת", שנבנו מראש למקרה של כניסת כוחות צה"ל לפנים הרצועה.

עם חשיפת ההיקפים של מערכת המנהרות שנבנו בעזה בשנים האחרונות התבקשה מאליה המסקנה, שחמאס נעזר בניסיון העשיר של מדינות שעשו במנהור שימוש טקטי ואסטרטגי יעיל במהלך מלחמותיהן: צפון-קוראיה, וייטנאם, אפגניסטן. ההשקעה הכלכלית במנהרות חמאס מוערכת במאות מיליוני דולרים, אם לא במיליארדים. סכומים אלה מתקבלים על ידי הכפלת המחיר של בניית מנהרה אחת המקשרת בין רפיח המצרית לרפיח הנוגעת בעזה (1-2 מיליון דולר) במספר המנהרות שכבר נחשפו ואף הושמדו על ידי מצרים. המספר הזה עבר ביולי 2014 את הסף של 1,700 ויש לאמוד אותו ב-2,000. מספר מנהרות הלחימה בגבול ישראל טרם נודע, אך ההנחה היא שהשקעה בהן גבוהה יותר מזו שבמסחריות (MEMO 2014).

מיותר לפרט איך הייתה נראית עזה לו היו משקיעים את המיליארדים, את כוח העבודה, את חומרי הבנייה ואת הזמן שבזבזו על בניית המנהרות בשיפור תשתיותיה של עזה ובשיפור רמת החיים של אזרחיה, שלא לדבר על הפגיעה בכלכלת עזה אחרי חסימת תנועת הסחורות ממצרים (Sherwood and Balousha 2013).

מכלול המבנים התת-קרקעיים שנחשפו בעזה מזכירים אם לא ערים תת-קרקעיות שלמות, אז לפחות מערכת של רכבת תחתית על רוב תשתיותיה הנלוות. בחלק מן המנהרות נמצא מסילות, קווי מתח גבוה, צינורות מים, דלק, גז ואמצעי קשר מתקדמים. התחזוקה והשימוש בתת-קרקע בעזה נעשים ביעילות של גוף צבאי מודרני לכל דבר ועניין ועל פי נהלים מדוקדקים. קיימת חלוקה על אזורי אחריות של כל חלק במכלול המנהרות. דגש מיוחד הושם על ביטחון השדה שסביב המנהרות. לכל מנהרה או חלקה יש אחראי משלה שמופקד על תפקודה בלבד. חשיפת חלק אחד של מנהרה לא מבטיחה אוטומטית את קריסתה של המערכת כולה. חלק מהמנהרות הן אוטונומיות, חלקן מקושרות לסמוכות להן ויש מנגנונים שבמקרה הצורך קוטעים את הקשר הפיזי ביניהן (באמצעות פיצוץ או דרכי חסימה כלשהן).

עומק המערכות התת-קרקעיות רב יחסית – יש בהן המגיעות ל-30 מ' ויותר. בחלק מן המנהרות יש כמה קומות או מפלסים, כלומר באותו התוואי, עוברות מנהרות אחדות זו מתחת לזו, ולאילו עוד יש פיתולים, מחלפים וצמתים בגדלים שונים וכן פתחי יציאה וכניסה מוסווים היטב או "מוגנים" בתשתית אזרחית מגוונת. עצם התוואי של מנהרות רבות עובר מתחת לבתי מגורים, מסגדים, בתי ספר, גני ילדים, בתי חולים ועוד.

כדי להחריב מנהרות השתמשו המצרים בחסימה, הצפה, הפצצה, החדרת רעלים, גזים ואש. אחד הפרויקטים כלל שימוש בקירות פלדה בעומק 30 מטר שהוחדרו לתת-קרקע בגבול (פרי 2009). כשניסו לחסל את יושבי המנהרה על ידי חסימה, השכילו אלה לקדוח את קורות הפלדה ולהתחמק (Donnison 2010). בפברואר 2013 נעשה ניסיון להציף מנהרות במים ובמקרים מסוימים אף בביוב (Al-Mughrabi 2013). צבא מצרים אף החדיר גזים רעילים לתוך מנהרות שהתגלו, אך עבר להשמדת מנהרות באמצעות פיצוצים מבוקרים (Ma'an 2014).

חיל ההנדסה של צה"ל פוצץ את פתחי הכניסה והיציאה של מנהרות שגילה, וגם עשה שימוש באמולסיה (תחליב) של חומרי נפץ שמוחדרת לתוך המנהרה והורסת את התוואי שלה. גילוי מנהרה דורש השקעה רבה בכוח אדם, מודיעין ובטכנולוגיה (עילם 2014). פיקוח קפדני על חומרי בנייה (מלט, צינורות, חומרי איטום, דיפון ובידוד) ועל ציוד מכני-הנדסי עשוי להקטין את התופעה, אך לא לחסלה. גאולוגים סבורים שאפשר לנטרל את עצם הכדאיות של החפירה על ידי הצפת המנהרות במי תהום הקיימים באזור ואפילו בכריית תעלת מים מלאכותית מקיפה, כך שבאתר החפירה יתמוטטו סלעים רוויי מים והמנהרה תוצף ותתמוטט (איפרגן 2014). אלא שמלבד ההשקעה הרבה, ברור שלאסטרטגיה כזאת יהיו השלכות אקולוגיות וגאופוליטיות מסוכנות.

לסיכום יש להדגיש, כי הפתרון היעיל ביותר נגד המנהרות הוא פירוזת של רצועת עזה. גוף בינלאומי או פוליטי פלסטיני מתון שינהל אותה עשוי למנוע את הצורך בבניית מנהרות, ועם כל ההטבות הכלכליות והגאופוליטיות הנלוות, זו עשויה להיות החלופה הטובה ביותר.

מנהרות עוינות – לקחים וביקורת אחרי מבצע "צוק איתן"

מיד לאחר נסיגת צה"ל מסיני נחפרו עשרות מנהרות בין רצועת עזה לסיני. עשו זאת בעיקר תושבי הפיח משני צידי הגבול הבינלאומי והם שהתמחו בחפירת המנהרות שדרך הוברחו משטחי סיני אמצעי לחימה וסחורות. לאחר כינון הסכמי אוסלו, גבר היקף הפעילות דרך המנהרות והן נוהלו על ידי ארגוני פשע וטרור, או במשולב. מאז ספטמבר 2000, תחילת אירועי האינתיפאדה השנייה, הפכו המנהרות למקור ראשי של אספקת אמצעי לחימה ותחמושת לפלסטינים ברצועה. צה"ל אמנם חשף עשרות מנהרות, אך הפלסטינים חפרו מאות ואולי אלפי מנהרות חלופיות בין מצרים לרצועת עזה.

נוסף על מנהרות הברחה, נפוץ שימוש הולך וגובר במנהרות תקיפה, שגם להן לא ייחסו חשיבות אסטרטגית במערכת הביטחון. ב-26.9.01 התפוצץ מטען רב-עוצמה במנהרה מתחת למוצב "טרמית" בתוך הרצועה ונפגעו חמישה חיילים. ב-12.2.2004 חדרו שני מחבלים דרך מנהרה למחסום ארז והרגו חייל בטרם נורו למוות. זה כבר היה הפיגוע החמישי בשלוש השנים שקדמו לאירוע. ב-2006

נחטף החייל גלעד שליט, הפעם מתוך שטח ישראל, והועבר לרצועה באמצעות מנהרה שנחפרה משני צדי גדר המערכת.

בשלב מסוים החלו להגיע איתותים שדבר דומה קורה לאורך גבול ישראל-לבנון, בעיקר מאז הנסיגה מלבנון בשנת 2000. בגזרה הצפונית אין חול וכורכר הקלים לחציבה לעומק כמו בעזה, וגם כיווני החפירה הפוטנציאליים מסיבות טופוגרפיות אינם נמתחים באופן ישיר. הטופוגרפיה הלבנונית ההררית והגיר-דולומיט הקשה יחסית אמנם מצריכים מכשירים מכניים-הנדסיים מתקדמים, לפחות פטישי אוויר, אך אין הדבר יכול לעצור ארגוני טרור או אפילו צבא סדיר לחדור או לפגוע מהתת-קרקע. פחות מסובכת מצטיירת מלאכתם של כוחות עוינים בגדה. מאזור גדר המערכת בין ישראל ליו"ש הגיעו ידיעות על מנהרות, או על שילוב מנהרות חדשות עם מנהרות קדומות, שנחצבו או הורחבו באזורי סלע הקרטון הרך והנוח לחפירה, ביחוד באזור בית גוברין ודרומה משם. ואכן מאזור זה לא פעם חודרים לישראל עובדים בלתי חוקיים וכן מבצעי פעולות טרור.

מאמרו של אל"מ יצחק איתן (2008) מלמד, כי הבעיה הייתה ידועה במלוא חומרתה, רק הפתרון היה חסר. מבצע "צוק איתן" הוציא את הנושא מה"תת-קרקע" והפך אותו לאתגר גלוי ומרכזי. מתברר שהיו כמה מהנדסים, פיזיקאים, גאולוגים ומומחים נוספים שהציעו לצה"ל פתרונות מגוונים. אנו יודעים רק על אלו שהרימו קולם וכיום צועקים – "הצענו, אמרנו, הראינו אך לא התייחסו אלינו!". כך, למשל, טוענים יוסי לנגוצקי ודורון אלטר (קבלן עפר ולוחם סירת מטכ"ל לשעבר). בין המצדיקים את מערכת הביטחון נמצא את ד"ר אורי פריזלנדר (מנכ"ל המכון הגאופיזי), הטוען שבשלוש השנים האחרונות יש שיתוף פעולה בין המכון לצה"ל בניסיון למצוא פתרון.

אטען אישית (ארנון סופר), שכמה אישים פנו אליי ברעיונות והעברתי אותם הלאה – ללא תגובה. ב-20.8.14 סיפר לי מומחה שהציע מכונה שתחפור תעלה לעומק של 15 מ', זו תורחב, ואזי יהיה אפשר להעמיק לעוד 15 מטרים (ביחד 30 מטרים). לשם כך יהיה צורך ליצור שיפוע קרקע משמעותי, שכן בסך הכול יחפרו "מפלצת" של כ-180 מ' רוחב. לשם השוואה: רוחב תעלת סואץ נע בין 100 ל-200 מ', ועומקה מגיע לכ-20 מ'. אפשר רק לשאול במה היא תמולא – במי ביוב, או במי ים. וכמובן, מה תהיה השפעתה על איכות מי התהום ברצועה בפרט ועל האקוויפרים של דרום מישור החוף בכלל.

ואם גם זה אינו הפתרון המושלם, יש הצעות שמבוססות על גילוי מוקדם של עבודות כרייה או חציבה תת-קרקעית לא רצויה. אפשר גם לחסוך את חציבת התעלה והרחבתה לממדים כה גדולים על ידי יצירת בורות בעומק 40 מ' ובקוטר של 40 ס"מ כל פיר. בפירים אלה ימוקמו חיישנים שיחשפו חציבה עוינת. החפירה מייצרת זעזועים סיסמיים ויש מערכות עם טכנולוגיה שיוודעת לקלוט זעזועים אלו היטב. טכנולוגיות אחרות מאפשרות "לראות דרך הקירות" וכמובן גם לעומק

התת-קרקע. השאלה שנותרת היא: מה עושים אחרי הגילוי? גם לכך יש תשובות טכנולוגיות מתקדמות, למשל רובוטים. לא נרבה עוד בספקולציות. נותר רק לקוות כי בקרוב ימצא פתרון ראוי לבעייה של מנהרות התקיפה.

סיכום

מסמך זה התמקד בירידה אל התת-קרקע. מערכת הביטחון עושה זאת כבר מאז קום המדינה, אך כיום למנהור משנה תוקף, לנוכח החשש ממאות ואלפי טילים המכוונים בשניות אלו ממש לכל פינה בישראל. על כן חובה על מקבלי ההחלטות במדינה להוריד אל מתחת לפני הקרקע כל דבר שיכול להקטין את הפגיעה בחוסנה של ישראל.

סקרנו את ההיסטוריה של המנהור ושל הנעשה בתחום בהווה בחלקי עולם שונים, אם בערים הגדולות, אם במערכות הביטחון השונות, למשל בבניית מקלטים בקנה מידה לאומי, כמו בשוודיה. עסקנו רבות בפתרונות צבאיים, כמו הורדת בסיסים שלמים אל מתחת לפני הקרקע. הזכרנו בין היתר את המנהור ככלי לקראת שינויי האקלים העלולים לפגוע באיכות החיים שלנו. הרחבנו בכל הנוגע לסכנת מנהרות התקיפה בעזה, שתושבי ישראל נוכחו בקיומן בקיץ 2014.

אמנם, בישראל אין מכרות נטושים שניתן להסב, אין בה תחנות כוח הידרואלקטריות או גרעיניות להקמה או להורדה אל התת-קרקע, ומתחת לעריה הגדולות אין קטקומבות שאפשר לנצל. כותבי המסמך אינם מצפים שכבר מחר ייבנו מבני מגורים שלמים מתחת לפני האדמה, גם לא מפעלי תעשייה. החקלאות הישראלית מסתפקת בינתיים בקרקע העילית. אבל, בטבלאות שבמסמך פירטנו את השימושים השונים האפשריים מתחת לפני הקרקע. המלצנו על בניית בתי חולים, תשתיות לשירות מערכת עילית של מפעלים, מוסדות חינוך, שירותים אזרחיים, מרכזי קניות ומערכות תשתית לכל הצרכים, מערכות הסעה המוניות ברכבות ובכבישים, כולל ארציים. אנו תקווה שהרשימה תגדל ושרעיונות נוספים יצטרפו להצעותינו.

מקורות

- אברהם, א' 2013. כלי רכב מנועיים בישראל בשנת 2012. *הלמ"ס: הודעה לעיתונות* (26.5.2013), 137/2013.
- איזק, ב' וא' סופר. 2014. *פיתוח בסביבה ימית*. חיפה: קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה.
- איפרגן, מ' 2014. פתרון של 100% למיטוט המנהרות. *The Marker* (24.7.2014).
- ארנון, נ' 2012. אושרו 60 חניונים תת-קרקעיים לשעת חירום: עיריית ת"א אישרה חניונים תת-קרקעיים בעיר כמקלטים שהוכשרו על ידי מהנדסים ויעמדו בתקן פיקוד העורף במקרה של תקיפת טילים. *מעריב NRG* (15.8.2012).
- בורט, מ' וא' סופר. 2014. *האופציה הימית - השדרה הכחולה*. קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה אוניברסיטת חיפה.
- ביסטרוב, י' וא' סופר. 2007. *ישראל 2007-2020, על דמוגרפיה וצפיפות*, חיפה: קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה.
- בר-אלי, א' 2013. שש קבוצות יתמודדו על כריית מנהרות הרכבת הקלה בגוש דן. *The Marker* (7.8.2013).
- ברונשטיין, י' 2014. *שינוע צהל בעיתות חירום*. חיפה: קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה.
- וייס, ש' 2014. *איים מלאכותיים בחופי ישראל*, אבן דרך בהתפתחות מדינת ישראל: חיפה: קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה, אוניברסיטת חיפה.
- חסון, י' 2013. כך בונים מנהרה של שמונה ק"מ מתחת לאיילון. *Ynet* (19.7.2013).
- יצחק א' 2008. מתחת לאדמה. *מערכות*, 422, 18-27.
- יצחק, ה' 2009. יו"ר "מקורות" אלי רונן: "מקורות" תכרה מנהרה באורך 14 ק"מ ובעומק של עד 350 מטר בעלות של מיליארד שקלים". *הודעות דוברות והסברה של חברת מקורות* (20.5.2009).
<http://www.mekorot.co.il/Heb/InfoCenter/Press/MekorotNews/Pages/tunnal.aspx>
- לישר, צ' ואחרים. 1997. *ניצול המרחב התת-קרקעי בישראל: רקע, פוטנציאל וכיווני פעולה*. ירושלים: מינהל מקרקעי ישראל, אגף תכנון ופיתוח.
- מזורי, ד' 2012. נחתם ההסכם להקמת בית חולים באשדוד. *מעריב NRG* (29.5.2012).
- סופר, א' וא' ברקובסקי. 2012. נספח ד': מסמך מסכם בנושא שינויי האקלים וגאואסטרטגיה. בתוך: *דו"ח מס' 2: המלצות מדיניות בתחומי מרכז הידע. שיווק בינלאומי של תוצרי מרכז הידע*, 184-247, מרכז ידע להיערכות לשינויי אקלים בישראל, אוניברסיטת חיפה.
- עילם, ה' 2014. המדע עדיין לא הצליח למצוא פתרון למנהרות. *כלכליסט* (28.7.2014).
- פטרסבורג, ע' 2012. החניון בביה"ח רמב"ם יוסב למתקן רפואי ממוגן. *Ynet* (23.4.2012).

- פרי, ס' 2009. חושך בקצה המנהרה: קירות פלדה בעומק 30 מטר ועוד צינורות יציפו ויחסמו את תעשיית הברחות של עזה. הפרויקט של מצרים למוטט את המנהרות של החמאס. *ידיעות אחרונות* (27.12.2009).
- משרד המשפטים וסנגוריה ציבורית. 2013. *עציפות אוכלוסין – דוח הסנגוריה הציבורית בנושא הצפיפות במתקני הכליאה* (7.7.2013).
- קוריאל, א' 2009. ברק מציע: מנהרה שתחבר בין רצועת עזה לגדה המערבית. *Ynet* (2.2.2009).
- קרת, ע' וא' ציפורי. 2014. עומדים בפקקים? בעוד 5 שנים המצב יהיה הרבה יותר גרוע. *גלובס* (16.2.2014).
- לשות המים*. 2011. יעדי המילת"ב לשנים 2011–2012.
<http://www.water.gov.il/Hebrew/Planning-and-Development/Pages/miltav-goals.aspx>
- שי, ש' 2003. הלוחמה התת קרקעית. *מערכות*, 389, 36–43.
- שכטר, א' 2014. הכסף שמתחת לבלטות: איך נהפכו המנהרות לעורק הכלכלי הראשי בעזה. *The Marker* (25.7.2014).
- שוון-עזר, ש' 2010. עמוק באדמה. *כלכליסט*, (20.10.2010).
- תמ"א 40. 2011. *מסמך מדיניות למיגון ולפיתוח תת-הקרקע, מהדורה סופית להצגת תמ"א 40 בפני המועצה הארצית* (29.6.2011).
- Ynet* (7.12.2003) הבור בירושלים: מכאן תנוהל המדינה בשעת חירום.
- Ynet* (24.11.2013) רכבת: הוכפלה המסילה בין ק. מוצקין לנהריה.
- Allen, J. 2012. Underground structures of the Cold War: the world below. *Defense & Security Analysis*, 28(4), 368-369.
- Al-Mughrabi, N. 2013. Egypt floods Gaza tunnels to cut Palestinian lifeline. *Reuters* (13.2.2013).
- Anderson, G., and B. Roskrow. 1994. *The Channel Tunnel Story*. London: E & F N Spon.
- Andrzejewski, M. 2010. An Outline History of the Underground Subway (Zarys dziejow metra). *Dzieje Najnowsze (Recent History)*, 1, 3-17.
- Apostol, T. 1995. The tunnel of Samos. *Engineering and Science*, 67(1), 30-40.
- Aydan, Ö., and R. Ulusay. 2003. Geotechnical and geoenvironmental characteristics of man-made underground structures in Cappadocia, Turkey. *Engineering Geology*, 69(3), 245-272.

- Bahmanyar, M. 2012. *Afghanistan Cave Complexes 1979-2004: Mountain strongholds of the Mujahideen, Taliban & Al Qaeda*. Osprey Publishing, Vol. 26.
- Barghouth, J., and R. Al-Saed. 2009. Sustainability of ancient water supply facilities in Jerusalem. *Sustainability*, 1(4), 1106-1119.
- Bertini, A. 2010. Underground Cities, Cave Dwelling, Cave Homes: Yesterday, Today, Tomorrow. In A. Bucci and L. Mollo (eds.), *Regional Architecture in the Mediterranean Area*, 104-110, Firenze: Alinea Editrice.
- Boer, E. D. 1999. Designing the Structure and Alignment of an Underground Logistic System; The Case of the Amsterdam Airport. In H. Meersman and E. Van de Voorde (eds.), *World Transport Research: Selected Proceedings of the 8th World Conference on Transport Research*. 1, 601-612.
- Boivin, D. 1991. Montreal's underground network: A study of the downtown pedestrian system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 6(1), 83-91.
- Broch, E., and J. Rygh. 1976. Permanent underground openings in Norway-design approach and some examples. *Underground Space*, 1(2), 87-100.
- Brown, M. 2003. Unmasked in Balaklava. *Transitions Online*, №. 10/30.
- Côté, L. 1972. *Heritage of power : the Churchill Falls development from concept to reality*. St. John's: Churchill Falls (Labrador) Corporation Limited.
- Couchard, I., and P. Van Bogaert. 2000. An Underground North-South Railway Crossing below the City of Antwerpen. In *IABSE Congress Report*, International Association for Bridge and Structural Engineering, 16(15), 768-773.
- Cui, J., A. Allan, and D. Lin. 2013. The development of grade separation pedestrian system. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 38, 151-160.
- Davies, O. 1979. *Roman mines in Europe*. New York: Arno Press.
- della Dora, V. 2011. Anti-landscapes: caves and apophysis in the Christian East. *Environment and Planning-Part D*, 29(5), 761-779.
- Damen, K., A. Faaij, and W. Turkenburg. 2006. Health, safety and environmental risks of underground CO₂ storage—overview of mechanisms and current knowledge. *Climatic Change*, 74(1-3), 289-318
- Donnison, J. 2010. Gazans cut through Egypt's border barrier. *BBC News* (6.5.2010).

-
- Eastler, T. 2004. Military Use of Underground Terrain. In D. R. Caldwell, J. Ehlen and R. S. Harmon (eds.), *Studies in Military Geography and Geology*, 21-37, Springer Netherlands.
- El Salam, M. 2002. Construction of underground works and tunnels in ancient Egypt. *Tunnelling and underground space technology*, 17(3), 295-304.
- Fischer H. 2007. *North Korean Provocative Actions, 1950-2007*. Congressional Research Service, Library of Congress.
- Fox, A. 2001. *The Power Game: the development of the Manapouri-Tiwai Point electro-industrial complex, 1904-1969*. PhD Thesis, University of Otago, Dunedin.
- Foulkes, I. 2007. Swiss still braced for nuclear war. *BBC-News* (10.2.2007).
- Gandy, M. 1999. The Paris sewers and the rationalization of urban space. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 24(1), 23-44.
- Glover, J. 2003. *London's Underground*. Hersham: Ian Allen.
- Harris, P. 2008. *Diary From the Dome, Reflections on Fear and Privilege During Katrina*. Vantage Press.
- Hasson, S. 2010. Gaza enclave: Victim, enemy, rival. *Geopolitics*, 15(2), 385-405.
- Hofman, P. 2009. *Unterirdisches Malta: Ein Exkursionsführer zu den Höhlen und unterirdischen Objekten der Inselgruppe*. BoD-Books on Demand.
- Holloway, S. 2005. Underground sequestration of carbon dioxide—a viable greenhouse gas mitigation option. *Energy*, 30(11), 2318-2333.
- Ikäheimonen, P., J. Leinonen, J. Marjosalmi, P. Paavola, K Saari, A. Salonen, and I. Savolainen. 1989. Underground storage facilities in Finland. *Tunneling and Underground Space Technology*, 4(1), 11-15.
- Kennedy, M. 2008. 100ft down, the capital's cold war warren gives up its final secrets. *The Guardian* (18.10.2008).
- Kershner, I. 2014. As Gaza Tunnels Closed, Hamas Lost Cash, Israeli Official Says. *The New York Times* (30.1.2014).
- Kirkland, C. 1989. Navigation of tunnels. *Journal of Navigation*, 42(3), 382-387.
- Levy, U. 1999. *The Lost Civilization of Petra*. Edinburgh: Floris.

- Lewy, Z. 2006. Short contribution: Geological and religious factors for subsurface quarrying that formed the Zedekiah Cave in Jerusalem, Israel. *Geoarchaeology*, 21(2), 187-196.
- Lichtenwald, T., and F. Perri. 2013. Terrorist Use of Smuggling Tunnels. *International Journal of Criminology and Sociology*, 2, 210-226.
- Lynch, M. 2004. *Mining in world history*. London: Reaktion Books.
- Ma'an News Agency (MNA). 2014. Egypt 'destroys 1,370 Gaza smuggling tunnels,' says army (12.3.2014).
- Matesan, I., and J. Gay 2011. El Arish and the Sinai Peninsula Underworld, Egypt. *Foreign Policy*, 20(3), 5-9.
- Mehra, J. (ed.). 1998. *Socio-Political Reflections and Civil Defense The Collected Works of Eugene Paul Wigner* . Vol. B/8.
- MEMO (Middle East Monitor). 2014. Egyptian Army destroys over 1,700 tunnels on its border with Gaza (24.7.2014).
- Merril, J. 2014. Growing Underground: Michel Roux Jr reveals plans for subterranean farm in the depths of empty south London tunnels. *The Independent* (30.1.2014).
- Multhau R. 1978. *Neptune's gift, a history of common salt*. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Netzer, E. 2008. *Architecture of Herod, the Great Builder*. Baker Academic.
- Pelham, N. 2012. Gaza's Tunnel Phenomenon: The Unintended Dynamics of Israel's Siege. *Journal of Palestine Studies*, 41(4), 6-31.
- Piboule, P. 1971. Un Habitat souterrain fortifié du Moyen Age: Les souterrains aménagés du Châtelleraudais. *Archéologie médiévale*, 1, 241-260.
- Piboule, P. 1978. Les souterrains aménagés de la France au Moyen Âge. *Archéologie médiévale*, VIII , 117-163.
- Pike, D. 2011. Paris Souterrain: Before and After the Revolution. *Dix-Neuf*, 15(2), 177-197.
- Qvenild, M. 2008. Svalbard Global Seed Vault: A 'Noah's Ark' for the world's seeds. *Development in Practice*, 18(1), 110-116.

-
- Remus, H. 1996. Voluntary associations and networks: Aelius Aristides at the Asclepieion in Pergamum. *Voluntary associations in the Graeco-Roman world*, 146-175.
- Robbins, R. 2000. Mechanization of underground mining: a quick look backward and forward. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37(1), 413-421.
- Rottman, G., L. Ray, and C. Taylor. 2006. *Viet Cong and NVA Tunnels and Fortifications of the Vietnam War*. Osprey Publishing Company, Vol. 48.
- Roy, R. 2006. *Earth-Sheltered Houses: How to Build an Affordable Underground Home*. New Society Publishers.
- Sandström, G. 1963. *The history of tunnelling: underground workings through the ages*. London: Barrie and Rockliff.
- Shepherd, R. 1993. *Ancient mining*. Published for the Institution of Mining and Metallurgy by Elsevier Applied Science; Distributed by Chapman & Hall.
- Sherwood, H., and H. Balousha. 2013. Palestinians in Gaza feel the Egypt effect as smuggling tunnels close. *The Guardian* (19.7.2013).
- Sikkel, H. 1993. An underground bus terminal in Amsterdam: Legal and policy issues. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 8(1), 31-36.
- Siösteen, B. 1979. Underground oil storage in Sweden. *Endeavour*, 3(4), 158-162.
- The World Bank*. 2010.
- Tsafri, Y., and B. Zissu. 2002. A hiding complex of the Second Temple period and the time of the Bar-Kokhba Revolt at Ain-Arrub in the Hebron hills. *Journal of Roman Archaeology – Supplementary Series*, 49, 7-36.
- Verini, J. 2012. The Tunnels of Gaza. *National Geographic*, 222(6), 42-67.
- Zimmels, Y., F. Kirzhner, K. Lux, and T. Zeller. 2006. Underground disposal of hazardous waste in Israel – Design principles and conceptual approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(1), 68-78.

במסמך זה אנו מסיבים את תשומת הלב לצורך בהתמודדות עם הצפיפות הקשה לא רק בהקמת איים ועלייה לגובה אלא גם מציעים לרדת אל התת-קרקע המהלך של ירידה לתת-קרקע וניצול יתרונותיה הרבים הם עדיין בעיקר רעיון, ואנו קוראים לזרזו כדרך חיים במדינה הקטנה שלנו.

המינהור טומן בחובו מגוון פתרונות לאתגרי התקופה: החל מצפיפות ודוחק שמעל הקרקע וכלה בהתמודדות הביטחונית, וגם כאחת הדרכים להתמודדות של ישראל עם שינויי האקלים.

ד"ר אנטון ברקובסקי – עמית מחקר בקתדרת חייקין לגאואסטרטגיה באוניברסיטת חיפה.

פרופ' ארנון סופר – ראש קתדרת חייקין לגאואסטרטגיה באוניברסיטת חיפה ומשמש גם ראש המרכז למחקר במכללה לביטחון לאומי.

