

קרקע

לליבון סוגיות קרקעיות

כתב עת




ממטרד למשאב

ניהול והשבת מי נגר עירוני

בעיר רגישת מים

יו"ר המכון: דני עטר



"קרקע" כתב עת של המכון לחקר מדיניות קרקעית
ושימושי קרקע (מייסודה של קרן קיימת לישראל)

רח' שפירא 11 תל אביב

מס"ק 0302-6252 ISSN

מנהל המכון: ישראל כהן

עורך "קרקע": יונתן למזה

בשער: איור אסף מירון

יו"ר המרכז לערים רגישות מים בישראל: ד"ר חיים מסינג

עריכה ותיאום מדעי: ירון זינגר

כותבים: טל אלון מוזס, אביתר ארל, אשר ברנר, אנה דלטיק, רוני וולך וערן פרידלר

סדר, עטיפה והדפסה: דפוס פרינטיב, ירושלים

קק"ל: <http://www.kkl.org.il>

המכון לחקר קרקעות: <http://www.karka-kkl.org.il>

תוכן עניינים

פתח דבר עמ' 4

מה זה "יצירת ערים רגישות מים" בישראל? עמ' 6

שער 1 - מחזור המים העירוני עמ' 11

חזון ערים רגישות מים בישראל עמ' 13

אפיון מי נגר עירוני בערים ישראליות עמ' 20

שער 2 - תכנון ועיצוב עירוני רגיש מים עמ' 37

פתרונות עירוניים עבור טכנולוגיות חדשניות עמ' 39

שער 3 - טכנולוגיות רגישות מים עמ' 55

ביופילטרים היברידיים לטיפול משולב במי-נגר ובמי-תהום עמ' 57

שער 4 - ערוצי יישוב עמ' 67

הבנת התכנון העירוני בהקשר ישראלי עמ' 69

הדגמת טכנולוגיות רגישות מים עמ' 80

ערים רגישות מים ממבטו של מתכנן עמ' 89

החוקרים עמ' 93

גופים מסייעים עמ' 94



פתח דבר

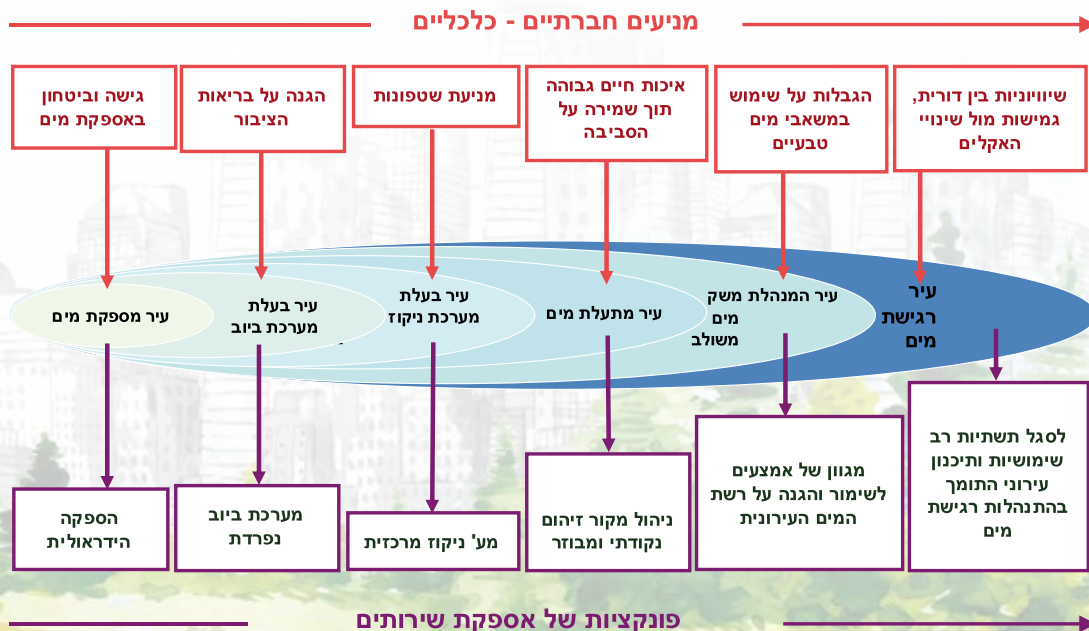
המרחב העירוני הופך לכר פורה עבור פיתוח אקולוגי בר קיימא. בעוד ש-60% מאוכלוסיית העולם צפויה להתקבץ בערים עד 2020, עד למחצית המאה נתון זה יעמוד על 80%. בישראל, שיעור האוכלוסייה העירונית הינו מהגבוהים בעולם ועומד על 90%, המתחלק על פני 76 ערים ועוד מספר יישוביים עירוניים.

"עיר רגישת מים" היא קודם כל רתימת מטרה הניקוז בערים לכדי משאב מים בטוח ומניב

המושג "קיימות" אשר צמח מיוזמות ופעולות שונות שנגזרו במקור מהגנה על הסביבה מוצא את המרחב העירוני כפוטנציאל מתפתח ליישום גישות וטכנולוגיות להן עשויה להיות השפעה ישירה ועקיפה על שיפור איכות החיים של התושבים במגזר הפרטי ובעיקר במרחב הציבורי בערים. פיתוח בר קיימא למעשה דואג לא לדלדל את המקורות הטבעיים, תוך מניעת פגיעה בשלמות ואיכות הקרקע והמים בעיר.

עיר רגישת מים הינה גישה שפותחה במקור באוסטרליה ותפקידה לתת מענה תכנוני וטכנולוגי לתכנון ועיצוב של המרחב העירוני הקיים והעתידי על מנת להתמודד עם השפעות שינויי האקלים כגון שיטפונות, חום ובצורת, ובעיקר רתימת מטרה הניקוז בערים לכדי משאב מים בטוח ומניב. כל זאת, תוך הגנה, שיקום ומניעת זיהום של גופי המים במורד הנחלים, אגמים, החופים והסביבה הימית. לעיר רגישת מים, על פי התפיסה האוסטרלית, יש מספר "אליפסות נרכשות" המאופיינות בשלבים של מניעים חברתיים-כלכליים, אל מול פונקציות של אספקת שירותים, כפי שניתן לראות באיור 1.

עיר רגישת המים



Brown et al, 2008

איור 1: סכמת מניעים ושירותים הבאים לידי ביטוי בעיר רגישת מים

בישראל לעומת זאת, החזון של ערים רגישות מים היינו עדיין בתהליך של עיצוב והתאמה לתנאים המקומיים בהקשרים פיזיקליים-כלכליים, תוך התאמה לצרכים האקלימיים והחברתיים.

בעוד שבאוסטרליה הרציונל המרכזי לעיר רגישות מים היה להגן על גופי המים במורד ולמנוע תופעות כגון Eutrophication (העשרה של נוטריינטים) המהווה סכנה למערכת האקולוגית המימית; בישראל (אשר פחתה תלות אקוטית במים מותפלים) המאמץ מתמקד בהשבה של מי נגר עירוני הנחשב כמטרד המסולק מחוץ לעיר, לטובת משאב מים חדש המעשיר את מי התהום ושיקומם כגוף מים זמין וחלופי, לרבות לשעת חירום.

עיר רגישות מים היא עיר בה נתיב זרימת המים בנוף העירוני מנוהל בהתאם למקורו ויעודו ונושא עמו ערך חברתי, רוחני וכלכלי.

מרכז המחקר לערים רגישות מים בישראל בתמיכת קק"ל וקק"ל אוסטרליה לצד רשויות מקומיות גיבש ומוכיל תוכנית מחקר יישומית בינתחומית הקרויה "יצירת ערים רגישות מים בישראל" בשיתוף חוקרים מובילים מהטכניון, מהאוני' העברית, מאוני' בן גוריון ובעזרתה של אוני' מונאש מאוסטרליה.

המרכז לערים רגישות מים מפתח ובוחר יישום עקרוני ערים רגישות מים בהתאם לתנאים ולצרכים של הערים בישראל על פי ארבעה מעגלים מרכזיים: 1. מעגל משק המים העירוני, 2. תכנון ועיצוב עירוני רגיש מים, 3. פיתוח טכנולוגיות רגישות מים, 4. בחינת ערוצי הטמעה.

מטרת מדריך זה הינה לשתף את הקוראים בתוצרי המחקרים לאחר השלמת שנה שנייה של עשייה, אבל בעיקר לעורר דיון ומודעות לפוטנציאל הטמון במי הנגר העירוני כמקור מים חדש ומניב בערים לרבות התמודדות עם תופעות שינויי האקלים, שיטפונות תכופים, "איי החום" העירוניים, דרדור אקולוגי ועוד. האפשרות לפתרון במקור, השתייה והשבה של מי הנגר - ברמת המגרש ואגן הניקוז, לשימושים שונים לטובת העירייה והתושבים, וכן מניעת זיהום בגופי המים במורד ושיקומם, הינם עקרונות יישומיים מובילים להטמעת גישת ערים רגישות מים.

המסמך הנ"ל מנסה לשרטט קווים ראשוניים של ניהול נגר עירוני כצעד ראשון לקראת מעבר לערים רגישות מים בישראל. יש לציין שהיבטים נוספים של משק המים העירוני, כמו אספקת מים, ביוב וניהול הצריכה הנם גם גורמים חשובים בעיר רגישות מים, יחד עם זאת, נושאים אלו אינם נכללים במסגרת המדריך הנ"ל.

"מדריך 2017" מציג הנחיות והצעות ליישום אשר מבוססות על סקר ספרות נרחב על פני מספר רב של דספלינות. וכן, מביא לפניכם קווים מנחים עבור הטמעת ערים רגישות מים בישראל בהתאמה לתנאים ולצרכים הייחודיים לישראל.

ד"ר ירון זינגר, מנהל המרכז לערים רגישות מים

מה זה יצירת ערים רגישות מים בישראל?

יצירת ערים רגישות מים בישראל הינה תוכנית מחקר מדעית בין-תחומית ארבע שנתית שתוכננה ליצור סביבה עירונית איכותית ובת קיימא באמצעות ניהול משק מים עירוני חדשני. התוכנית גובשה בהנחייתה של אונ' מונאש באוסטרליה, המובילה את הנושא בעולם, יחד עם שלושה מוסדות מחקר מובילים בישראל: האונ' העברית, הטכניון ואוניברסיטת בן גוריון שבנגב. מטרת העל של תוכנית המחקר היא לקדם ערים מקיימות (sustainable cities) תוך יצירת מרחב עירוני באיכות חיים גבוהה (liveable) בערים והתאמה לצרכים המיוחדים ולתנאים הייחודיים של משק המים העירוני הישראלי.

ממטרת העל נגזרים מספר יעדים לתוכנית. ראשית, התוויית הדרך להגשמת חזון הערים הרגישות למים (WSC), על ידי שילוב טכנולוגיות ושיקולים סוציו-אקונומיים בניהול רגיש מים לרווחת המגזר העירוני. שנית, פיתוח טכנולוגיות רב-שימושיות חדשניות לקציר נגר עירוני בחורף, וטיפול במי תהום מזוהמים בקיץ לצורך שיקום אקוויפרים וכך לתרום גם לאיכות החיים של קהילות מקומיות. שלישית, הקמת אתרי הדגמה ובניית יכולת: שיתוף הקהילה והמגזר הפרטי והציבורי לצורך בניית הון חברתי וממסדי עבור ערים רגישות מים והשקתן של עבודות מפתח אשר תדגמנה את עיקרון עיר רגישת מים. ורביעית, יצירת בסיס מוצק ומוכח מדעית ויישומית לטובת מדיניות להטמעה לאומית.

מתאר התכנית

הפרויקט מורכב מארבעה פרויקטי אב (פילרים) אינטגרטיביים, כפי שמומחש באיור 2. כאשר כל פילר מאגד בתוכו מספר פרויקטים. תוכנית המחקר המוצעת מקיפה מחקר מדעי הנעשה במספר דיסציפלינות, תוך שיתוף פעולה לצורך שילוב מאמצי המחקר וממצאי המחקר לאורך תקופה של ארבע שנים. הרציונאל לשילוב פעילויות המחקר העיקריות של התוכנית מאגד שתי רמות, דהיינו, (א) פיתוח ושכלול של פרספקטיבת המחקר בניסוח שאלות ליבה מחקריות לאחר ביצוע סקר ספרות מקיף מהארץ ובעולם; והן (ב) ביצוע המחקר באוניברסיטאות השונות תוך אינטגרציה של התובנות המחקריות באמצעות תכנון ויישום של פרויקטים הדגמה של נוף אקולוגי ועיצוב עירוני בטווח של קנה מידה יישומי במסגרת פילר ערוצי הטמעה שבעצם דואג לבחון את תוצרי המחקר בשטח הישראלי.



איור 2: ארבעת פרויקטי האב בתכנית המחקר

מה זה יצירת ערים רגישות מים בישראל?

כאמור, כל פילר מהווה פרויקט אב ומכיל עד 3 תתי פרויקטים. פילר 1 דן במחזור המים העירוני ועוסק בכימות מקורות מים קיימים ועתידיים בסביבה העירונית: מי-תהום, מים אפורים (דלוחין), מים שחורים (צואין) ובעיקר במי נגר עירוני. תת פרויקט 1.1 מבצע "zoom out" לאתגרים ולניסיונות בישראל אל מול פתרונות רגישי מים בעולם, ומשם מנסה לגזור את החזון לערים רגישות מים בהקשר הישראלי. פרויקט 1.2 הינו פרויקט הדן בנגר העירוני כפוטנציאל למשאב מים עירוני ומתמקד בעיקר באפיון ובכימות פוטנציאל מי הנגר העירוני, ומקיף היבטים של משקעים אל מול כמות, ספיקות ואיכות מי הנגר העירוני על פני שימושי קרקע שונים כגון: שכונת מגורים, כביש, אזור תעשייה זעירה ועוד.

פילר 2 עוסק בתכנון ועיצוב עירוני רגיש מים על ידי זיהוי אתגרים וחסמים ביישום תכנון רגיש מים בערים ומתמקד במציאת פתרונות משולבים לתכנון עירוני רגיש מים חדשני הקשוב למנטליות, צרכים, אקלים ושינויי אקלים בערים בישראל. בפילר זה מככב פרויקט 2.1 שמטרתו להבין היכן ובאיזה אופן ניתן לשלב אסטרטגיות רגישות מים במרקם העירוני להחדרת מי נגר עירוני למי התהום ולאמוד את התרומה האפשרית לאיכות החיים, ובפרט למיקרו-אקלים של העיר.

פילר 3 עוסק בהמשך פיתוח טכנולוגיות מים רגישות מים חדשניות רב שימושיות. ועל כן פרויקט 3.1 עוסק בפיתוח ביופילטרים היברדיים רב עונתיים הנותנים מענה בחורף לקצירת נגר, השהייה, טיהור והעשרת מי תהום אל מול שיקום אקוויפרים מקומיים מחנקות וזיהומים שכיחים אחרים.

פילר 4, הקרוי ערוצי יישום והטמעה, מהווה פילר אינטגרטיבי של כל המחקרים ועוסק במינוף הידע והטכנולוגיה לכדי אמצעים רגישי מים אשר יבנו ויבחנו כפיילוטים בערים בתנאי אמת. תת פרויקט 4.1 עוסק בהבנת התוצאות החברתיות, הטכניות והכלכליות של תכנון עירוני רגיש מים מתקדם, תוך מיפוי חסמים והזדמנויות של יישומים קיימים. לעומתו, פרויקט 4.2 אחראי להדגמה, בחינה וניטור של מערכות בקנה מידה מלא על-מנת לספק "הוכחת היתכנות" להפוך את מי הנגר העירוני מהמטרד, המיוחס אליו כיום בהיותו משוחרר אל מחוץ לעיר, לטובת משאב מים חדש ומניב לערים ולתושבים.

החדרת המים إدخال المياه

3

מערכת מודולרית

منظومة الفصل والتركيب

המים המטוהרים מוחדרים לאקוויפר באמצעות באר החדרה, או באמצעות באר חלחול רדודה.

يتم إدخال المياه النقية إلى طبقات المياه الجوفية بواسطة بئر إدخال، أو بواسطة بئر تسريب ضحلة.



ממטרד למשאב. הדמיית המערכת. עיבוד: אסף מירון

קליטת המים استيعاب المياه

איסוף וקליטה של מי הגגר ממערכת הניקוז העירונית והובלתם ביעילות אל הביופילטר.

تجميع واستيعاب مياه السيول من منظومة التصريف البلدية ونقلها بنجاعة إلى البيوفيلتر



טיהור המים تنقية المياه

המים מחלחים דרך שכבות המצעים בביופילטר ועוברים סינון וטיהור.

يتسرب الماء عبر طبقات المسطحات في البيوفيلتر ويمر بعملية تصفية وتنقية.





שער 1

מחזור המים העירוני

כימות מקורות מים קיימים ועתידיים בסביבה העירונית:
מי תהום, מים אפורים (דלוחין) מים שחורים (צואין),
מי נגר עירוני, מים מושבים וכד'

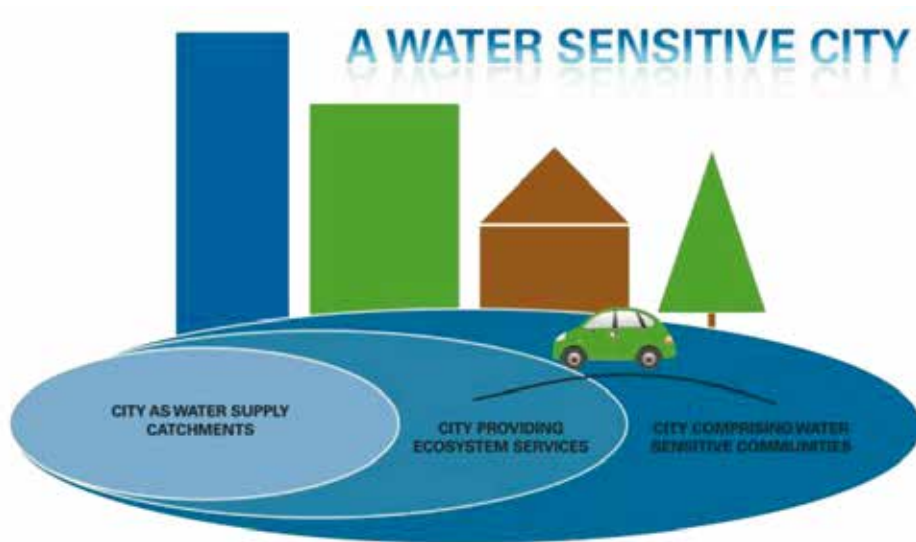




פרויקט 1.1: פיתוח חזון ערים רגישות מים בישראל

הדרך בה אנו מנהלים את משאבי המים העירוניים מעצבת היבטים רבים של הסביבה העירונית ואת איכות חיי תושבי העיר. ערים רגישות למים מאמצות ומשלכות פתרונות מבוזרים וריכוזיים של ניהול מים, וזאת כדי לספק ביטחון מים עתידי, לשפר את המיקרו-אקלים והנופים העירוניים ולצמצום טביעת הפחמן של העיר. עיר רגישת מים מורכבת משלושה עקרונות מובילים (איור 3) אשר עומדים ביסוד עיר רגישה למים (Wong et al., 2009):

- "עיר כאגן אספקת מים" – משמעו גישה למים דרך מגוון מקורות במגוון סקאלות של אספקה;
- "עיר המספקת שירותים למערכת האקולוגית" – משמעו שהסביבה הבנויה מתפקדת בצורה משלימה ותומכת בסביבה הטבעית;
- "עיר המורכבת מקהילות הרגישות למים" – משמעו שתהליך קבלת ההחלטות על ידי האזרחים והתנהגותם עומדים ביסוד קיימותן הסביבתית של עריהם.



איור 3: עקרונות מובילים עליה מתבססת עיר רגישה מים

קציר נגר עירוני חיוני לצורך הגשמת חזון "ערים רגישות מים" וניתן למנות את הסיבות לכך. ראשית, הנגר העירוני עשוי להיות מקור משמעותי של מים ה"נוצר" קרוב למקום בו הוא נחוץ. זרימות מי נגר מאזורים עירוניים מזהמות את הנחלים העירוניים, ובמורד פוגעת בחופים ובים. מתקני טיפול בנגר עירוני הקרויים 'גינות גשם' או 'ביופילטרים' מכילים צמחייה הצפויה לשפר את המיקרו-אקלים העירוני, לצמצם את העומס התרמי, ולפיכך אף לסייע ולמנוע סיכונים בריאותיים לציבור במרחב העירוני. בנוסף, קציר מי נגר תוך שימוש בתשתית ירוקה משפר את מידת הנעימות בסביבה האנושית, ופעילות זו צפויה להתקבל באהדה על ידי הציבור. בהיבט הכלכלי, מערכות איסוף מי גשמים מניבות מקור מים היכול להקל על צריכת המים בעיר להשקיית גינות ציבוריות ופרטיות, לרבות הקלה וייעול מערכות הניקוז הקורסות תכופות, אבל, בעיקר, להעשיר את מי התהום במי נגר מטוהרים כאוגר מים תפעולי ולשעת חירום. מלבד זאת, יכולים אמצעים אלו לתפקד לרוב ללא צריכת אנרגיה, ולכן הדבר מפשט את הטמעתם.

מבוא

מערכות אספקת המים נתונות בשנים האחרונות ללחצים ולחוסר ודאות הנגרמים כתוצאה מגידול אוכלוסייה, תהליך עיור מואץ ושינויי אקלים. תהליך העיור משפיע בצורה משמעותית על שימושי הקרקע באזור, וכתוצאה מכך גם על איכות המים וכמויות המים. איכות מי אגמים ואקוויפרים שונים בעולם, המספקים מים לאוכלוסיות גדולות, נמצאת בהידרדרות מתמדת. ההידרולוגיה של אגני ההיקוות הושפעה דרמטית מתהליך העיור אשר הביא להגדלת חלקם היחסי של שטחים אטומים (בלתי חדירים לחלחול) וליצירת שטחים אטומים גדולים ורצופים ובכך להגדלת כמות הנגר העילי ולהקטנת החלחול למי התהום.

לשינויי אקלים השפעה משמעותית על תכנון מערכות אספקת מים מפני שהם גורמים לשינויים בכמות ובתפוצת המשקעים, מגדילים את התדירות של אירועי אקלים קיצוניים כדוגמת אירועי גשם עוצמתיים מחד ושנות בצורת מאידך, עלולים להגדיל באופן ישיר ועקיף את העוצמות של אסונות טבע, לפגוע בזמינות המים, לגרום לעלייה במפלס מי הים, להשפיע על משתני אקלים הידרולוגיים ולגרום למחסור במשאבי מים. מפני שמשתנים הידרולוגיים הינם מורכבים וקשורים זה לזה, השפעתם על הנגר העילי ועל מקורות המים מורכבת.

ההשפעות המשולבות של תהליך העיור ושינויי האקלים על כמויות הנגר העילי כמו גם על מקורות מים באקוויפר שנמצא לחוף ים מוצגות באיור 4. מהאיור ניתן ללמוד כי תהליך עיור מקטין מחד את המילוי החוזר של מי התהום באזור העירוני, ומאידך גורם לעלייה בצריכת מים. שתי תופעות אלה עלולות לגרום לירידה במפלס מי התהום, כאשר באקוויפר שנמצא לחוף הים משמעה עלול להיות נסיגה של הפן הביני לתוך היבשה והמלחה של בארות. תהליך העיור, המגדיל את השטחים האטומים, מלווה גם בכמויות הולכות וגדלות של נגר שאותו צריך לסלק/לנצל ביעילות מהאזור העירוני על מנת למנוע הצפות. שינויי אקלים צפויים להגביר את הבעיה, משום שצפויים להיות פחות אירועי גשם אך בעוצמה גבוהה יותר, דבר שיגביר עוד יותר את כמות הנגר העירוני ויפחית עוד את החלחול למי התהום שבאזור העירוני.

בנוסף לאמור לעיל, עקב גידול האזורים העירוניים יש להביא אליהם יותר מים, ועקב הקטנת שיעור החלחול, יש לסלק יותר מי נגר ביעילות (על מנת למנוע הצפות). שתי דרישות אלה מובילות לעלייה משמעותית בהשקעה בתשתיות שכן קטרי הצנרת ברשת הולכת המים לצרכנים והן קטרי הצנרת ברשת איסוף הנגר העירוני צריכים לגדול באופן משמעותי. שינויים בתשתיות אספקת מים, בתשתיות הביוב העירוני ובתשתיות איסוף הנגר העירוני, מצריכים מציאת פתרונות יעילים לניהול משאבי המים ולשינוי מערך אספקת המים העירוני לכיוון של ניהול ופיתוח בר קיימא.



איור 4: השפעת שינויי אקלים ותהליך העיור על מי תהום באזורים חופיים

מטרות ויעדים של פיתוח חזון ערים רגישות מים בישראל

מטרתו של תת-פרויקט זה היא לפתח חזון כולל עבור ערים רגישות מים בישראל, המקיף היבטים מדעיים, כלכליים וחברתיים. המחקר מתבסס על מטה-אנליזה (meta-analysis) שבה נבחן ומנתח הידע הקיים אודות נושאים ספציפיים הקשורים במטרתו של תת-פרויקט זה, כדוגמת השפעות פוטנציאליות של התחממות גלובלית; מגמות גידול אוכלוסין וביקוש למים; מכומתים קצבי עיור ואופי המרקמים העתידיים של שטחים עירוניים; ומנותחים השפעותיהם על פוטנציאל קציר הנגר העירוני לשימוש חוזר ואו לשיקום אקוויפרים. המחקר בוחן את תרומתם הכוללת לערים רגישות למים ובודק היבטים של קבלה על ידי הציבור, כמו גם חסמים/תמריצים מוסדיים של מקורות מים עירוניים חלופיים, בהקשר של ערים רגישות למים.

מאמר זה, המסכם את השנתיים הראשונות למחקר (מתוך ארבע) סוקר את הנושאים הנ"ל, ומתעמק בנושאי העיור, גידול האוכלוסייה בישראל ושינויי האקלים באזורינו, תוך ניתוח המצב הנוכחי ותחזיות עתידיות עבור אגן הים התיכון וישראל בפרט. דו"ח המאמר אף מתאר מספר צעדים רגישים למים, נושא אשר יורחב בהמשך.

מאזן המים של ישראל וקציר נגר עירוני

התפלת מי-ים היא נתיב בלתי-נמנע שאותו מדינת ישראל הייתה חייבת לאמץ, אם ברצונה לתת מענה לצריכת המים העירונית הגדלה במהירות, כתוצאה מגידול אוכלוסין. כפי שמתואר באיור 5, עד שנת 2050 (פחות מארבעים שנה מהיום) היא תצטרך להגדיל את תפוקת ההתפלה לכ-1,500 מיליון מ"ק/שנה. הדבר יהיה כרוך בבניית כחמישה עשר מתקני התפלה נוספים לאורך קו החוף הצפוף כבר כיום, ובנוסף לעלויות בנייה ותפעול גבוהות, תהיינה לכך גם השפעות שליליות על הסביבה הימית הקרובה, זיהום האוויר המקומי/אזורי וההתחממות הגלובלית, בשל צריכת אנרגיה גבוהה וכו'.

ניתן לצמצם רמה עתידית זו של התפלה, אם במקביל למערכות הריכוזיות המסורתיות, ייעשה גם שימוש במערכות מבוזרות, לצורך אספקת מים לשימושים שלא-לשתייה בטוחים (לדוגמה, מים להשקיית מרחבים ירוקים בנוף העירוני, הדחת אסלות, מים לקירור וכו').

החלופה הראשונה המוצעת היא לכלול קציר נגר עירוני, פעילות אשר נכון להיום, כמעט שאינה מיושמת בפועל בישראל. נגר עירוני מוגדר כמי נגר שמקורם במשטחים עירוניים סלולים, ובהקשר זה, הם נבדלים ממי נגר הנלכדים משטחים פתוחים (יער, קרקע חקלאית, או שטחי מרעה). אף על פי שנדרשת הערכה מעמיקה בנוגע לנפחי הנגר הזמינים, קיימות מספר ראיות לפיהן עד שנת 2050, בשל העיור המוגבר הצפוי (שפירושו כיסוי הקרקע בדרכים, בתים ומדרכות), ערי ישראל צפויות להניב כ-160 מיליון מ"ק/שנה מי נגר. אם מקור מים זה יילכד, יטופל ולאחר מכן ייעשה בו שימוש הוא יצמצם את התפוקה השנתית של מים מותפלים ב-10%. יתר על כן, לכידתו של המשאב האלטרנטיבי ה"חדש" הזה יגן על האקוויפרים וישפר את איכות החיים בערים (liveability).

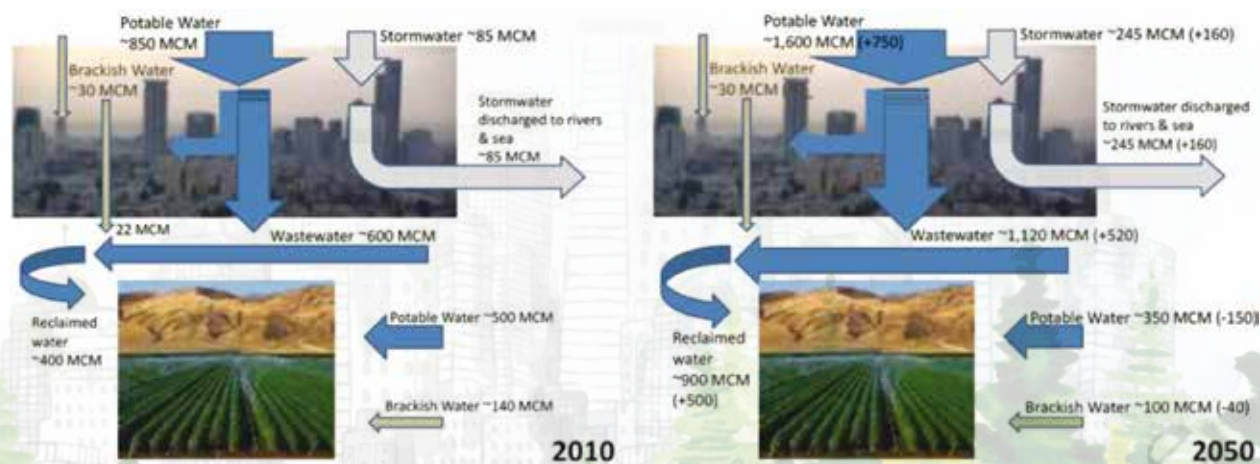
1. גורמים המשפיעים על זמינות המים בערי ישראל

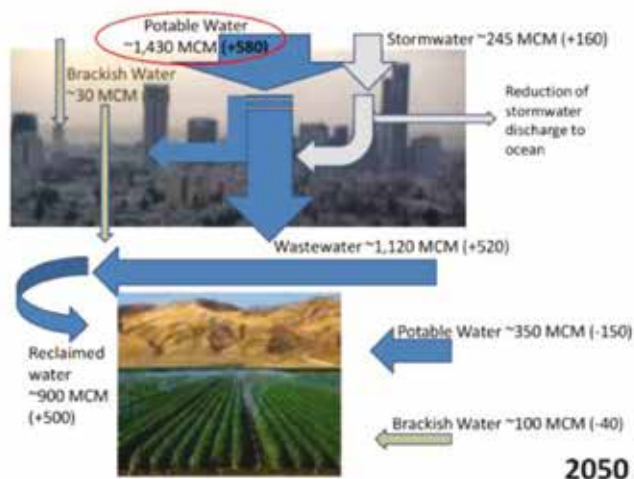
שינויי אקלים

**אם בעבר
הצפון נחשב
כאזור הגשום,
הרי שבשנים
האחרונות
המגמה
התהפכה**

בישראל מעל 80% מכמות הגשם השנתית מתקבלת במהלך עונת החורף הקצרה (דצמבר-מרץ) המאופיינת בהפוגות ארוכות בין אירוע לאירוע. כמות המשקעים הנמוכה והתנודתיות הגדולה הן הגורמים העיקריים למילוי טבעי נמוך של מקורות המים ושל המחסור במים. על פי נתוני השירות ההידרולוגי, בשנים האחרונות אנו חווים שינויים אקלימיים המתבטאים ברצף של שנות בצורת (החל משנת 2013/14) בהן כמויות המשקעים בשקלול ארצי נמוכות ביחס למוצע הרב-שנתי. בנוסף, קיימת מגמה של שינוי בפריסת המשקעים האזורית. אם בעבר הצפון נחשב כאזור הגשום במדינה המספק מים למרכזה ולדרומה, הרי שבשנים האחרונות המגמה התהפכה. המגמה של הצטמצמות יחס המשקעים צפון/דרום נמשכת כבר כמה עשורים ומחריפה בשנים האחרונות. המשמעות שלה מבחינת מקורות המים הטבעיים היא ירידה חדה בשפיעת המעיינות בצפון, בספיקות הנחלים ובכניסות המים לכנרת. בנוסף למגמה של ירידה בכמות המשקעים השנתית בצפון הארץ

וגידול בכמות המשקעים באזור השפלה ומישור החוף הדרומי, ישנה מגמה של הקצנה במערכות הגשם אשר באה לידי ביטוי באירועי גשם עוצמתיים יותר בזמן קצר ובפריסה פחות אחידה של אירועי גשם לאורך התקופה הגשומה. התופעות המוזכרות לעיל עשויות להשפיע בצורה דרמטית על כמויות הנגר העירוני הנוצרות (בחורפים האחרונים היינו עדים לאירועי הצפות לא מעטים בערים במרכז ובדרום מישור החוף) וכן על יעילות לכידת מי השיטפונות ומי הנגר והיכולת לנצל מים אלה.





איור 5: שימוש עירוני וחקלאי נוכחי ועתידי חזוי במים בישראל - תרחיש "עסקים כרגיל" (למעלה) ושילוב מערכות מבוזרות לקציר נגר עירוני (למטה)

* המספרים בסוגריים מציינים שינוי מ-2010 ל-2050

מונחים: Stormwater - נגר עירוני; Potable Water - מים באיכות מי שתייה; Brackish water - מים מליחים; Reclaimed water - מים ממוחזרים

Ziv et al. (2013) חקרו את מגמות משטר הגשמים בישראל משנת 1975 ועד לשנת 2010 ומצאו עלייה בכמות המשקעים עד לתחילת שנת 1990 ולאחריה ירידה חדה לקראת סוף שנת 2010 בשיעור של כ-2% לעשור. תחזית נוספת המבוססת על ניתוחים סטטיסטיים, בוצעה ע"י Givati and Rosenfeld (2013) אשר חזו ירידה בשיעור של 10% בכמות הגשמים בצפון הארץ בשנים 2020-2050 בעוד שלא נצפתה מגמה ברורה עבור דרום הארץ. התחזית הקודרת ביותר דווחה על ידי Milano et al. (2013), ולפיה כמות הגשמים צפויה לקטון ב-30% עד לשנת 2050.

משאבי המים של המדינה יושפעו שלילית משינוי האקלים. ככל שאוכלוסיית המדינה תגדל, מקורות המים "הטבעיים" לנפש צפויים לרדת לרמה נמוכה מאוד לכדי 61 מ"ק/נפש לשנה, עד אמצע המאה. משמעות הדברים היא כי המגמה הקיימת של הפחתת מכסות המים לחקלאות, המסתמכת יותר ויותר על שפכים מטופלים כמקור המים, תמשך והמדינה תסתמך יותר ויותר על התפלה כדי לענות על צרכי המים.

גידול אוכלוסייה ותהליך העיור

בישראל הדרישה למים גבוהה מיכולת מקורות המים לספק מים זמינים ומשברי מים אחת למספר שנים היו דבר שגרתי עד כניסתה של המדינה לעידן ההתפלה. אוכלוסיית ישראל גדלה מ-4.5 מיליון נפשות ב-1990, לכ-8.8 מיליון נפש בהווה (ספטמבר 2017). גידול זה הביא להכפלת הדרישה למים. אוכלוסיית המדינה ממשיכה לגדול בקצב של כ-1.8% לשנה, ועל פי התחזיות היא צפויה להגיע לכ-16 מיליון נפש ב-2050 (כמעט תכפיל את עצמה). המשמעות היא שצריכות המים העירוניות גם כן כמעט יכפילו את עצמן. לפי נתוני רשות המים נכון ל-2015 צריכת המים הסגולית העירונית לנפש עמדה על כ-81 מ"ק לנפש לשנה (כ-220 ליטר לנפש ליום) והצריכה העירונית (הכוללת את משקי הבית) הייתה מעל 700 מיליון מ"ק/שנה. בהנחה שצריכת המים הסגולית לא תפחת, צפויה הצריכה העירונית ב-2050 לעמוד על כ-1,300 מיליון מ"ק בשנה.

במקביל לגידול האוכלוסייה, בישראל קיימת מגמה ברורה ועקבית של מעבר מהכפר לעיר, כאשר מגמה זו התגברה עד שנות האלפיים ומאז התייצבה על רמה קבועה פחות או יותר של 91-92% מהתושבים חיים בערים.

תהליך העיור, המביא להחלפת שטחי צמחייה פתוחים ומחלחלים במשטחים בלתי חדירים, מהווה הפרעה לנוף הטבעי. התרחבות השטחים האטומים והגדלת הקישוריות שלהם משפיעה משמעותית על ההידרולוגיה של האזור וגורמת לשינוי בחלוקת המים, כאשר זרימה תת-קרקעית הופכת כולה לנגר עילי. הגדלת השטחים האטומים גורמת לתגובת נגר מוגברת, עקב עליה ביחס נגר-גשם, המתאר את היחס בין נפח הנגר העילי שנוצר לנפח הגשם שירד, אפילו בעקבות אירועי גשם קטנים. עיור גורם גם לשינוי במערכת הניקוז הטבעית.

שינויים בהתנהגות ההידרולוגית עקב עיור כוללים עלייה בנפח הנגר העילי, הגדלת ספיקות השיא, קיצור זמן הניקוז והגדלת המקדם נגר-גשם. מקדם הנגר-גשם השנתי הממוצע ברוב אזורי הארץ עומד על כ-5%, כלומר 5% מהגשם הופך לנגר. לעומתו באזורים עירוניים מקדם הנגר-גשם גדול פי 4 ועומד על כ-20%. מקדם הנגר הסופתי באזור לא עירוני מגיע ל-20-30% ובאזור העירוני מקדם זה גדל ל-40%. בנוסף, בגלל אופי הבנייה בישראל כיום (בנייה רוויה) ולא בנייה של בתים צמודי קרקע, במקרים רבים מקדם הנגר-גשם בעיר עולה עם "התחדשות" העיר ובמקביל יורד מספרן של נקודות פוטנציאליות לקליטת וחלחול מי הנגר בצורה טבעית. תופעה זו תחריף עם השנים כתוצאה מגידול חלקה של הבנייה הרוויה, אלא אם כן תתרחב ה"בנייה המשמרת מים".

אפקט נוסף של גידול האוכלוסייה ועיור היינו העלייה בצפיפות המגורים שיכולה להשפיע ישירות על מי הנגר בערים. לפי נתוני הלמ"ס (תחזית אוכלוסייה לטווח רחוק 2009-2059), ב-2009 צפיפות האוכלוסייה בארץ עמדה על 326 נפש/קמ"ר, נתון הדומה למדינות מפותחות אחרות בעולם, ב-2015 צפיפות האוכלוסייה בארץ עמדה על כ-365 נפש/קמ"ר (עליה של 12% ב-6 שנים). עוד עולה מנתוני הלמ"ס כי צפיפות האוכלוסייה בישראל אינה מתחלקת באופן שווה בין המחוזות וכי קיים קשר ישיר בין מיקומו המרחבי של המחוז (במרכז / שולי המדינה), לבין הצפיפות הממוצעת במחוז.

צפיפות האוכלוסייה במחוז המרכז, בו מתגוררת רבע מאוכלוסיית ישראל, גבוהה פי 4 מצפיפות האוכלוסייה הארצית. מחוז תל אביב הוא הצפוף ביותר כאשר הצפיפות בו גדולה פי 20 מהממוצע הארצי. לעומת זאת, צפיפות האוכלוסייה במחוז הדרום, המרוחק מלב המדינה, דלילה מאוד (בשני סדרי גודל מהצפיפות במחוז תל-אביב ומהווה כרבע מהצפיפות הארצית). לפי התחזית של הלמ"ס עד שנת 2031 צפיפות האוכלוסייה בארץ תגיע ל-500 נפש/קמ"ר וב-2059 ל-700 נפש/קמ"ר, כמעט פי שניים מהצפיפות ב-2015, כאשר פיזור האוכלוסייה ימשיך כנראה להיות לא אחיד. במחוז תל אביב צפוי צמצום של כ-11% בשטחים הפתוחים. כאמור, תהליכים אלה הם בעלי השפעה ישירה על ההידרולוגיה של האזור עקב הקטנת חלחול מי הגשם למי תהום, הגדלת הנגר העילי, קיצור זמן הניקוז והקטנת זרימות הבסיס.

צעדים רגישים למים

קציר גשם היינה גישה שמטרתה איסוף מי הגשמים וביצוע שימוש חוזר במים אלו תוך כדי הקטנת הנגר העירוני. ישנן שתי גישות לקציר גשם: איסוף מקומי (onsite) של מי הגשמים מגגות הבתים; ואיסוף מי נגר שנאספים בשטחים ציבוריים (מדרכות, מגרשי חנייה, כבישים וכו') החל מרמת המבנן, דרך רמת השכונה וכו'. על-פי (2014) Goldshleger et al. בעבודה בהרצליה וברעננה הראו שמקדם הנגר-גשם באזורי מגורים היה 0.3 ואילו באזור תעשייה הוא היה 0.7. זאת כתוצאה משיעור שטח בלתי חדיר גדול יותר באזור התעשייה.

תהליך העיור שהביא לשינוי קיצוני בתכנית פני השטח ולהגדלת החלק היחסי של משטחים כהים (בולעים קרינת שמש), במקביל לפעילות אנושית הגורמת לפליטה מוגברת של חום (תחבורה, מערכות מיזוג אוויר, תאורה וכו') ולאפקט הקניון (רחוב בין בניינים גבוהים) הביאו להיווצרות "איי חום עירוניים". תופעה זו מאפיינת בתנאים מיקרו-אקלימיים בעיר השונים מאלו שבשטחים הפתוחים הסובבים את העיר. **התופעה מתבטאת בדרך כלל בעלייה בטמפרטורה קרוב לפני השטח, והיא מורגשת במיוחד בשכבת האוויר הכלואה בין פני הקרקע לקו גגות הבתים. התופעה חמורה יותר בערים בעלות ריכוזי אוכלוסייה גדולים.**

האקלים העירוני תלוי בגורמים כגון שימושי קרקע, חומרי בניין שונים וצורה גאומטרית של רחובות העיר. מספר פעולות הוצעו על מנת לשפר את יכולת סילוק החום על ידי הפחתת ייצור החום האנתרופוגני וביצוע שינויים תכנוניים כגון: יצירת גגות/קירות קרירים, יצירת שטחים פתוחים ופארקים וכן, שימוש בחומרי בנייה מתאימים, למשל חומרים וחיפויים בעלי מקדם החזר קרינה גבוה. אמצעי משמעותי לקירור פסיבי בהקשר העירוני הוא צמחייה, בעיקר עצים, היוצרים צל. **קציר נגר עירוני יכול להוות מקור מים לצמחייה המפחיתה את "איי החום" ותורמת לנוחות התרמית של תושבי העיר.**

אקוויפר החוף – מקרה בוחן

אקוויפר החוף, אחד ממקורות המים הטבעיים המשמעותיים בישראל, משתרע על פני שטח של כ-1,800 קמ"ר, מהכרמל בצפון ועד חבל עזה בדרום, ולרוחב רצועה הנמשכת מקו החוף במערב ועד 20-7 ק"מ מזרחה. המילוי החוזר הטבעי של אקוויפר זה מוערך בכ-250 מלמ"ק בשנה. האקוויפר מנוצל במאות קידוחים הפרוסים לאורכו ולרוחבו. ב-2015 כ-40% מאוכלוסיית המדינה התגוררה במישור החוף (מעל האקוויפר) וכ-16% מאוכלוסיית המדינה מתגוררת במטרופולין תל אביב. מישור החוף מתמודד עם גידול עירוני נרחב שמשמעותו עלייה בכיקוש למים, ירידה בחלחול לאקוויפר החוף וסכנת זיהום פוטנציאלית מוגברת שלו. **אקוויפר החוף נתון ללחצים מתמשכים עקב נדידת הפנ הביני מקו החוף מזרחה בעקבות שאיבת יתר והפחתה במילוי החוזר הטבעי עקב עיור.** על פי נתוני הלמ"ס, המליחות של אקוויפר החוף עלתה במקומות רבים לרמה של מעל 200 מג"ל. במקומות אחרים סובל האקוויפר מריכוזי ניטרטים גבוהים שהובילו לסגירת בארות לא מעטות.

על פי התחזית של השרות ההידרולוגי, המבוססת על הרצת מודלי אקלים, למרות שישנה מגמה של ירידה בכמות המשקעים הכללית באזור מישור החוף כתוצאה משינוי משטר האקלים (עלייה בעוצמת אירועי הגשם יחד עם הפחתה במספר האירועים) וכן כתוצאה מתהליך העיור, צפוי גידול של כ-20% בספיקות השיא עד שנת 2050 וכ-30% עד שנת 2075. מגמות אלו ישפיעו בצורה ישירה על כמות מי הנגר הנוצר והזמין בערים: מחד צפוי להיות יותר נגר, שאם לא יטופל במעלה יוביל לזרימות גדולות מאוד במורד ולסכנת שיטפונות. מאידך, **איסוף וטיפול מתאימים של הנגר והחדרתו לאקוויפר החוף צפויים להגדיל את המילוי החוזר שלו.**

Carmon and Shamir (2010) ציינו כי עד שנת 1990 אקוויפר החוף איבד כ-70 מיליון מ"ק לשנה מילוי חוזר, עקב תהליך עיור שגרם לירידה בחלחול. מחברים אלה אף חזו כי במידה ומדיניות ונהלי הפיתוח העירוניים המקומיים יישארו ללא שינוי, עד לשנת 2020 יזרום מאזור זה לים נפח שנתי של עשרות מיליוני מ"ק של מי נגר עירוני. על מנת להקטין/למנוע זאת יש לפתח פתרונות עירוניים לאיסוף טיפול ומחזור מי הנגר בתוך המרקם העירוני. **הקמת מתקנים משולבים לטיפול והחדרת מי נגר לאקוויפר כחורף וטיפול במי תהום המכילים ניטרטים בקיץ צפויים להגדיל את המילוי החוזר של אקוויפר החוף ולשפר את איכות המים.**

פרויקט 1.2: אפיון נגר עירוני בערים בישראל (כפר-סבא כמקרה בוחן)

מבוא

מי נגר עירוני בעולם ובישראל נחשבים כמטרד, וככאלה, מסולקים מחוץ לערים על ידי הזרמה לנחלים או לים. מחקרים רבים מצביעים על כך שנגר עירוני עלול להכיל קשת רחבה של מזהמים אורגניים ואי אורגניים, מתכות כבדות וחיידיקים פתוגניים. זיהום זה עלול לזהם את גופי המים אליהם זורם הנגר העירוני. גישת ערים רגישות מים אשר פותחה לאחרונה באוסטרליה רואה במי הנגר העירוני משאב פוטנציאלי העשוי להוות מקור מים חילופי או נוסף לשימוש עירוני נרחב כבר במקור (בסמוך לאזורים בהם יורד הגשם).

בעוד שבישראל מתבצעת התפלת מי-ים בהיקף נרחב עקב עלייה בדרישה למים מחד וירידה מתמשכת בכמות המשקעים הממוצעת, ההתייחסות לנגר העילי העירוני כאל משאב מים כמעט ואינה קיימת. קיימות ראיות לפיהן בשל העיור המואץ הטומן בחובו הגדלה משמעותית בתכסית עירונית בלתי חדירה (אספלט, בטון וריצוף), ערי ישראל צפויות להניב עד שנת 2050 נפח נגר עירוני מוגדל. לכידה ושימוש במים אלה לאחר טיפול מתאים עשויים להגדיל את מצאי המים (שאינם מיועדים לשתייה) וכתוצאה מכך לצמצם משמעותית את התלות והתפוקה השנתית של מים מותפלים, כולל ההשפעות הסביבתיות השליליות הנלוות לכך. בנוסף, השבת מי הנגר העירוניים והחדרתם למי תהום עשויים להקטין את המלחת אקוויפר החוף מחד ולהעלות את איכות החיים בסביבה העירונית (liveability) מאידך.

על-מנת להפוך את מי הנגר העירוני למשאב מים זמין, יש צורך באפיון כמותי של נפח מי הנגר המיוצר בערים ובעיקר לעמוד על איכותם. מטרת פרויקט זה היא לבחון כמותית את שני האספקטים הנ"ל תוך התמקדות בתתי אגנים בעלי שימושי קרקע שונים בעיר כפר סבא כמקרה בוחן.

מטרת המחקר

המטרה המרכזית של המחקר הינה לבחון ולאפיין את הכמות והאיכות של מי נגר עירוני בשלושה ייעודי קרקע שונים (כביש, אזור תעשייה זעירה ואזור מגורים) בעיר כפר סבא כמקרה בוחן. בחינה ואפיון אלה ישמשו כנתוני קלט לתכנון מערכות השבה כגון ביופילטריציה ואחרות לטיפול במים אלה. מטרה מרכזית זו מתחלקת למטרות משנה כלהלן:

1. איתור שלושה תתי אגנים הכוללים שימושי קרקע ותכסית שונים.
2. אפיון הפן ההידרולי של יחסי גשם-נגר וההרכב הכימי של הנגר העילי עבור תתי אגנים אלה.
3. כימות תהליכי הזרימה וההסעה של הנגר העילי עבור תתי האגנים. כימות זה יסייע בהמשך להקיש על אגנים דומים אחרים בערים אחרות לטובת שקלול פוטנציאל מי הנגר ברמה הלאומית (upscaling).

שיטות וציוד

את הפעילות בשנה השנייה ניתן לחלק לשלושה חלקים: (1) שדרוג ארונות הדיגום והמדידה ע"י הוספת בקר המאפשר רצף דיגום רב אירועים; (2) שינוי מדיניות הדיגום והרחבת בדיקות המעבדה למהמים נוספים; (3) אפיון מי הנגר משימושי הקרקע השונים והשוואתם לתקני איכויות מים שונים.

כדומה לעונה קודמת נמדדו ונדגמו מי הנגר משלושת האגנים הבאים: אגן ראשי ואגני משנה במזרח כפר-סבא המתנקזים לתעלה ראשית הממוקמת לאורך כביש 55 בסמיכות למתחם הקניית G. האגן הראשי (G) בשטח של כ- 2,785 דונם; תת-אגן הכולל אזור מגורים (R); תת אגן הכולל אזור מסחר ותעשייה זעירה (L); וכן תת אגן הכולל כביש (T) המוצגים באיור 6 (בעמוד הבא).

תיאור אגן הניקוז הראשי ואגני המשנה

אגן ההיקוות הכולל שאותר במזרח כפר סבא בשטח של 2,785 דונם מתנקז כולו לתעלה פתוחה בעלת מוצא יחיד. אגן זה כולל 32 אגני משנה, מתוכם מנוטרים שלושה בעלי המאפיינים הבאים (איורים 6 ו-7):

G - אגן הניקוז ראשי המתנקז לתעלת ניקוז ראשית המהווה סכס לכל האגן, 2,785 דונם.

R - אזורי מגורים הכוללים כבישים, מדרכות, גינות, מבנים וכו', 173 דונם.

L - אזור מסחר ותעשייה זעירה הכוללים מוסכים, בתי מלאכה, חנויות וכו', 192 דונם.

T - כביש 55 בינעירוני בעל תנועת רכבים ערה בכל שעות היום, 5.8 דונם.



- אגן ניקוז ראשי G
דונם 2,785
- תת-אגן מגורים R
דונם 173
- תת-אגן תעשייה זעירה L
דונם 192
- תת-אגן כביש T
דונם 5.8
- תחנת דיגום/ניטור
במוצא האגנים

איור 6: גבולות שלושת תתי אגני הניקוז, L, T, R המוכללים באגן הגדול G לרבות ציון מיקום התקנת תחנות הדיגום/ניטור



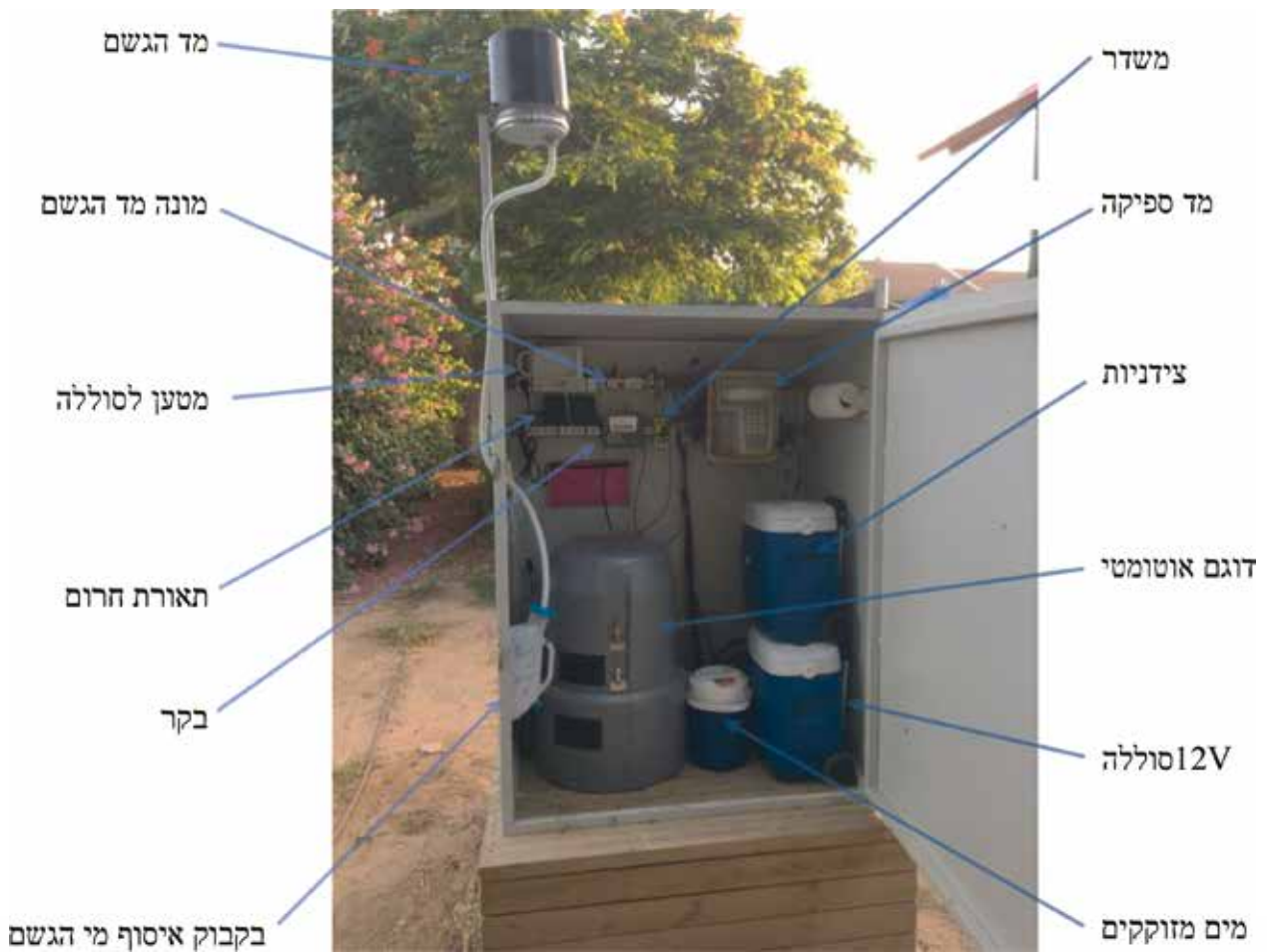
איור 7: מימין- אגן T המהווה קטע מכביש 55, במרכז- אגן R הכולל מגורים בבנייה רוויה למחצה, משמאל- אגן L הכולל תעשייה זעירה ומסחר צילומים: עדי האפט

מערך ציוד הניטור והדיגום

במוצא אגני G, L, T ו-R הותקנה נקודה למדידת ספיקה ונפח של הנגר העילי (הידרוגרף) ודיגום מי הנגר עילי באמצעות דוגם נגר. הנגר נאסף בבקבוקים ייעודיים ששונועו בקירור למעבדה אנליטית בפקולטה ברחובות לטובת אנליזה כימית. במעבדת בקטוכם בנס ציונה בוצעו אנליזות מיקרוביאליות לרבות TKN ו-COD. נקודת הניטור/ דיגום בנקודות L ו-R נמצאות בתוך צינור ניקוז עירוני ובנקודות L ו-G בתעלת ניקוז מלבנית פתוחה שעל אחד הקירות מופיע סרגל לציון מפלס המים בו השתמשנו לציון מפלס המים בזמן איסוף הדוגמאות (זאת בנוסף למדידה online המתבצעת בתחנה). הציוד הותקן בארון מתכת הממוקם על בסיס מוגבה, כאשר הצינורות והרגשים יוצאים מתחתית הארון דרך הבסיס אל מרכז התעלה/הצינור (איור 8, בעמוד הבא). ציוד בתחנת הניטור/דיגום כולל ארבעה מרכיבים עיקריים:

1. מד ספיקה מסוג דופלר משולב במד מפלס המבוסס על מדידת לחץ דיפרנציאלי.
2. דוגם נגר אוטומטי.
3. בקר מתוכנת אשר מוגדר ייעודית לכל אחד מהאגנים על פי נתוני הזרימות מעונת הגשמים הראשונה.
4. מד גשם קומפקטי המותקן על גבי מגש לאיסוף מי הגשם והולכתו בצינור לבקבוק איסוף מי הגשם (איור 9).

במהלך אירוע גשם מד הספיקה שולח אות לבקר בכל כמות נגר מוגדרת (שעבר בתחנה) בכל אחד מהאגנים. כאשר מושג נפח נגר נתון (השונה מתחנה לתחנה) מופעל הדוגם האוטומטי למשך של 15 שעות באינטרוולי זמן ההולכים וגדלים במהלך הסופה. מתח ההזנה הן למד הספיקה והן לדוגם הינו מסוללה 12V הנטענת בלילה באמצעות חיבור לעמודי תאורה הסמוכים לתחנות, דבר המאפשר לציוד לפעול בצורה אוטונומית לחלוטין. נתוני הספיקה נשמרים באוגר נתונים של מד ספיקה ומשודרים לענן שם ניתן לצפות בהם בזמן אמת לטובת איסוף דוגמאות הנגר על ידי הדוגם האוטומטי, לרבות מועד לאיסוף הבקבוקים המלאים והחלפתם בבקבוקים ריקים. בנוסף, בכל תת אגן מותקן מד גשם קומפקטי לניטור המשקעים לסנכרון עם אירועי הנגר הנצפים במורד האגן – בתחנות הדיגום. מי הגשם ממד הגשם נאספים לבקבוק איסוף מי הגשם, הנאסף אף הוא ומשנוע למעבדה בקירור לשם ניתוח איכות מי הגשם.



איור 8: נקודה למדידת ספיקה ונפח של הנגר העילי (הידרוגרף) ודיגום מי הנגר עילי באמצעות דוגם נגר צילום: עדי האפט

מד ספיקה מסוג דופלר

בהתייחס לרוחב התעלה וקוטרי הצנרת בהם מתבצע הדיגום, מדידת הספיקה בכל אחת מנקודות המוצא של תתי האגנים מתבצעת על ידי מד ספיקה דופלר מסוג SIGMA 950. מד ספיקה זה מתבסס על חיישן bubbler למדידת מפלס המים במקביל לטכנולוגיית דופלר אקוסטית לניטור מהירות הזרימה. היות וזרימת המים בתעלות ובצינורות גדלה במהירות ממצב של העדר זרימה למצב של זרימה בחתך כמעט מלא, לא ניתן היה להסתפק במדידת גובה הנוזל בצינור/תעלה וחישוב הספיקה על פי עקום כיול המותאם בהתאם לחתך הגאומטרי ולמהירות שתימדד באופן חד-פעמי עבור גובהי הזרימה השונים. לחילופין, מהירות וגובה הנוזל נמדדו בזמן אמת על ידי רגש מתקדם משולב השולח פולס דופלר אל הנוזל למדידת מהירות הזרימה הממוצעת ובו זמנית משחרר בוועיות אוויר לתחתית הנוזל על מנת לחשב את עומק הנוזל (בעזרת חישוב ההתנגדות לשחרור הבוועיות) (איור 9). נתונים אלה בשילוב משוואה המתארת את גאומטריית הצינור/תעלה מוזנים למד ספיקה שמתרגם את הנתונים לנפח וספיקת המים הזורמים בצינור/תעלה. הרכבת מד הספיקה נעשתה ע"י חיבור הסנסור לתחתית הצינור או התעלה כאשר האות מועבר למעבד מד הספיקה המותקן בתחנת ניטור (בתוך הארון הסגור) וממנו נשלח אות לאתחול תכנית הדיגום בדוגם האוטומטי

ובו בזמן נשמר אוגר הנתונים במעבד ומשם משודר לאתר אינטרנט (rdks.realiteq.net/ui/main) בו ניתן לצפות בהידרוגרף של מד הספיקה בתחנה הרלוונטית לרבות הורדת טבלאות נתונים להמשך ניתוח ועיבוד (איור 9).



איור 9: מימין, מד הספיקה עם יחידת הסנסור. במרכז, התקנת ציוד הניטור/דיגום בתחתית התעלה. משמאל, דוגמה הידרוגרף של אירוע נגר בתחנה G 23.2.16 כפי שנצפה באתר האינטרנט צילומים: יח"צ ועדי האפט

בקר מתוכנת

בתום עונת הגשמים הראשונה, לאור התנהגות הגשם ומי הנגר באזור כפר סבא, הוסף לכל תחנה בקר מתוכנת. בעונה הראשונה, מד הספיקה שלח פולס ישירות לדוגם האוטומטי לאחר מדידת נפח מים מצטבר שנקבע מראש ושיקף עומק של 3 ס"מ מים שממנו הדוגם מסוגל לדגום, ומרגע זה ואילך, הדוגם האוטומטי נכנס למחזור דיגום באינטרווולי זמן שונים על פני 15 שעות גם אם פסקה זרימת מי הנגר או ירדה מתחת למפלס המינימום (3 ס"מ). לאור זאת, בעונת הגשמים הראשונה נרשמו מספר רב של ניסיונות דיגום לא מוצלחים בהיעדר זרימה, או לחליפין לא נלקחה דגימה בתום האינטרוול למרות שהחלה זרימה שוב לאור אירוע גשם חדש מספר שעות לאחר האירוע הקודם. בעונת הגשמים השנייה בעזרת בקר מתוכנת מסוג Unitronics Jazz™ (איור 10) שתוכנת במיוחד עבור המחקר, התגברנו על בעיה זו.



איור 10: בקר מתוכנת מסוג Unitronics Jazz™

בעונה הנוכחית לאחר תוספת הבקר ותכנותו בהתאם להתנהגות תת-האגן שעליו הוא מופקד, נקבעה מדיניות איסוף דגימות בהתאם לטבלה 1. בעבור האגן כולו G מד הספיקה תוכנת לתת פולס לבקר בכל 2 מ"ק העוברים בתעלה, בעוד שבתתי-אגנים L ו-R בכל 0.5 מ"ק ואילו בתת-אגן הכביש הקטן במיוחד, בכל 0.01 מ"ק (טבלה 1). הבקר מודד את הזמן בין הפולסים על מנת לחשב את הספיקה המינימלית להתחלת הדיגום. בצורה דומה הבקר תוכנת לחשב את הספיקה להפסקת הדיגום בכל תחנה ותחנה ולסיים את אירוע הגשם. תדירות הדיגום נשארה דומה לעונה

הראשונה לפיה נלקחים 7 דיגומים באינטרוול של 10 דקות בשעה הראשונה, לאחר מכן יורדת התדירות והדיגום עבור 6 הדוגמאות הבאות מתבצע כל 20 דקות בשעה השנייה והשלישית, מדוגמה 14 עד 24 תדירות הדיגום יורדת לדיגום בודד בכל שעה. הדיגום התדיר בתחילת הסופה נועד להבין את דינמיקת השתנות איכות מי הנגר לאורך אירוע הנגר על פני הידורגרף. עבור תחנת הדיגום T, אשר מנטרת את מי הנגר מתת-אגן הכביש, תוכנת הבקר לאסוף דיגימה בכל 5 דקות בשעה הראשונה ובכל 10 דקות בשעה השנייה והשלישית.

טבלה 1: הפרמטרים המתוכנתים לבקר עבור כל אחת מתחנות האיסוף

פרמטר	יחידות	תחנה G	תחנה L	תחנה R	תחנה T
נפח מים לפולס	מ"ק	2	0.50	0.50	0.01
זמן בין פולסים המזהה העדר זרימה	שניות	580	580	580	580
ספיקה להתחלת דיגום	מ"ק/שעה	40	10	10	0.5
ספיקה להפסקת דיגום	מ"ק/שעה	20	5	5	0.2
מספר הדגימות	n	24	24	24	24
מחזור דיגום בשעה הראשונה	דקות	10	10	10	5
מחזור דיגום בשעה השנייה והשלישית	דקות	20	20	20	10

דוגם נגר אוטומטי

בכל אחת מארבע התחנות הותקן דוגם נגר אוטומטי מסוג SIGMA AS 950 מתוצרת HACH™. הדוגם בעל שני חלקים: בסיס נייד המכיל 24 בקבוקים בני ליטר אחד, ומכסה המכיל את יחידת הבקר עם ממשק התכנות וכן משאבה פריסטטלית עם זרועה חלוקה (איור 11).



איור 11: משמאל, דוגם אוטומטי מסוג SIGMA AS 950 בארון המחקר בתחנה L על שני חלקיו, הבסיס המכיל תוף של 24 בקבוקי דיגום והמכסה, הכולל את יחידת הבקרה וממשק המשתמש לרבות משאבת פריסטטלית וזרוע חלוקה (חבויה). מימין, מסך היסטוריית הדיגום כפי שנצפה בדוגם ב-31.2.15, כאשר בקבוקים בהם לא התקבלה דגימה נצבעים באדום. צילומים: עדי האפט

מד הגשם

מד הגשם הינו מסוג Tipping Bucket Rain Gauge מתוצרת Rain Wise דגם: RainLog™ 2.0 (איור 12) הותקן מעל ארון הדיגום בכל אחד משלושת תתי האגנים R,L,T. מד גשם זה פועל על עקרון של מניית הפעמים בהן נטו כפות צבירת גשם מצד לצד בהתאם לנפח הגשם שהצטבר עליהן (איור 12). מדי הגשם הותקנו על פני מגש איסוף מי הגשם בגובה של 2.5 מטר, מפולס ופתוח מכל כיוון עם אוגר נתונים Rain Log המוזן ע"י בטריות ומסוגל לאחסן חודשים רבים של נתוני גשם. את נתוני הגשם מורידים מרושם הנתונים לתוכנה המותקנת על גבי מחשב נייד ברזולוציה של מספר מילימטרים של גשם אשר נרשמה בכל דקה בודדת באוגר הנתונים (איור 12).



איור 12: משמאל, מד הגשם ותוכנו, במרכז, אוגר נתוני הגשם Data logger, מימין, תצוגה גרפית של כמות המשקעים במ"מ צילומים: עדי האפט

בעונה הראשונה מדי הגשם הותקנו עצמאית במרכז שלושת תתי-האגנים. אבל מפני שתתי האגנים קטנים, ומצאנו ערך בתוספת איכות מי הגשם כמדד להשוואה לעונת הגשמים השנייה, העברנו את מדי הגשם ומיקמנו אותם מוגבהים מעל תחנות האיסוף (איור 13). כדי לאסוף את מי הגשם העוברים דרך מד הגשם, מגש ייעודי נבנה בקוטר מד הגשם, ומי הגשם יורדים בגרוויטציה דרך צינור היוצא ממגש האיסוף אל מיכל איסוף מי הגשם הנמצא בתוך ארון הדיגום (איור 13). מי הגשם נאספים ממכל זה לבקבוק הנאסף יחד עם 24 בקבוקי מי הנגר ומסומן כבקבוק מספר 25.



איור 13: משמאל, מיכל איסוף מי הגשם, במרכז, מתקן ייעודי לאיסוף מי הגשם, מימין, ארון הדיגום עם מד הגשם המוגבה וצינור מי הגשם היוצא ממנו אל מיכל האיסוף הממוקם בתוך הארון צילומים: עדי האפט

אנליזה כימית של מי הנגר

בקבוקי המים שנאספו מדוגם הנגר (איור 13) הובלו בקירור (צידניות וקרחומים) למעבדה בפקולטה לחקלאות, מזון וסביבה ברחובות לאנליזה כימית. עבור כל בקבוק נמדדו הפרמטרים הבאים: 1. כלל מוצקים מרחפים – TSS על פי (SM) 2540D Standard Method, EC 2, pH 3 בעזרת אלקטרודה ניחת מדגם SevenEasy מתוצרת Mettler Toledo, 30 מתכות ויסודות: (Ag) כסף, (Al) אלומיניום, (Br) בריום, (B) בורון, (Cr) כרום, (Cu) נחושת, (Ca) קלציום, (Cd) קדמיום, (Co) קובלט, (Fe) ברזל, (Hg) כספית, (K) אשלגן, (Li) ליתיום, (Mg) מגנזיום, (Mn) מנגן, (Mo) מוליבדן, (Na) נתרן, (Ni) ניקל, (P) זרחן, עופרת, (S) גופרית, (Si) סלניום, (St) סטרונציום, (An) אנטימון, בדיל, (Ti) תליום, (V) ונדיום, (Zn) אבץ. אנליזה זו בוצעה באמצעות מכשיר ICP Radial ICP-OES מסוג Arcos מתוצרת Spectro LTD, Germany.

משרטוט של הערכים המדודים הנ"ל לאורך ציר הזמן שנקבע על פי הזמן בו נשאבו מי הנגר העילי לבקבוק מתקבלים פולוטוגרפים, $C(t)$ עבור על פרמטר בכל אחד מארבע נקודות הדיגום. הפולוטוגרף יחד עם ההידרוגרף, $Q(t)$, מהווים כלים מרכזיים בניתוח הדינמיקה של הסעת המומסים בכל תת אגן עבור סופת גשם נתונה. כך גם ההשוואה בין פולוטוגרפים והידרוגרפים הנמדדים עבור אגן מסוים עבור סופות גשם עוקבות כמו גם השוואה בין פולוטוגרפים והידרוגרפים הנמדדים במוצא אגנים שונים עבור סופת גשם נתונה.

כלי נוסף להשוואה הפלט של תתי אגנים עבור סופת נתונה ו/או סופות גשם שונות הוא ה-Event Mean Concentration EMC – שמוגדר כמסה הכוללת של המרכיב הנמדד במוצא האגן לאורך הסופה, מחולק בנפח הנגר העילי עבור אותה סופה. באופן מתמטי מוגדר ה-EMC (1):

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int C(t)Q(t)dt}{\int Q(t)dt}$$

ה-EMC משמש גם להשוואת התוצאות הנמדדות עם ערכים שנמדדו באגני היקוות אחרים המופיעים בדוחות ומאמרים, וכן עם תקנות איכות מים מקומיות ובינלאומיות. ה-EMC משמש גם כקלט לתכנון של מתקני טיפול במים (ביופילטרים וכו').

בעוד בעונה הראשונה חושב ה-EMC מתוך מיצוץ התוצאות של הבקבוקים שנאספו, בעונה השנייה הוכן בקבוק מיצוץ (משוקלל על פי ספיקה) המייצג את ה-EMC עבור כל סופת גשם לכל אחת מהתחנות על מנת שילקח לבריכות המעבדה בתוך 6 שעות לאנליזות מיקרוביאליות של חיידקים פתוגניים/אינדיקטורים הכוללות: ספירת חיידקי קולי צואתיים (SM 9222 B) וחיידקי אי-קולי (SM 9222 G), האנליזות המיקרוביאליות בוצעו במעבדת בקטוכם בנס-ציונה.

בעונת הגשמים השנייה הורחבו האנליזות ונמדדו גם חנקן כללי (TN) ופחמן אורגני מומס (COD) באמצעות מכשיר TOC-Vesh מתוצרת Shimadzu, כמו גם מספר מזהמים נוספים: פלואור (F), כלוריד (Cl), ברום (Br), חנקית NO_2^- , חנקת NO_3^- , סולפט SO_4^{2-} ופוספט PO_4^{3-} .

תוצאות ודיון

לעומת חורף חורף 16-2015 בהם נדגמו 18 אירועי נגר מלאים, במהלך עונת הגשמים 2017-2016 נדגמו ונוטרו 16 ימי גשם, וזאת עקב עונת גשמים קצרה יחסית. נפח הנגר שנמדד במוצא אגן הניקוז כולו (G) היה כ-336 אלף מ"ק (טבלה 2) מכמות משקעים מצטברת של 481 מ"מ. כמות משקעים זו מהווה כ-87% מממוצע המשקעים השנתי בכפר-סבא שהינו 550 מ"מ (לעומת עונת הגשמים הקודמת עם 575 מ"מ).

טבלה 2: כמויות נגר וגשם כפי שנמדדו בתחנות המדידה בעונת הגשמים 2017-2016

חודש	תחנה G (מ"ק)	תחנה L (מ"ק)	תחנה R (מ"ק)	תחנה T (מ"ק)	גשם (מ"מ)
דצמבר 2016	225,312	* 31,138	12,822	1,040	323
ינואר 2017	35,426	7,321	1,580	49	58
פברואר 2017	68,301	14,120	3,936	207	90
מרץ 2017	3,401	626	74	11	5
אפריל 2017	3,815	357	77	12	5
סה"כ	336,225	53,562	18,489	1,319	481

* נתוני הכמויות בתחנה L בחודש דצמבר הוערכו כ-13.8% מהכמויות שעברו בתחנה G עקב תקלה במד הספיקה בתחנה זו

לשם השוואת נתוני הזרימה בין שתי עונות הגשמים שנמדדו, הוצגו הנתונים באחוזים (טבלה 3), כאשר כמות המים הכוללת שנמדדה במוצא האגן הראשי (G) בכל אחת משתי השנים ושטחו מהווים 100%. נפח הנגר מתת אגן L, המהווה 6.9% מהאגן הכללי G, היה 12.4/15.9% מנפח הנגר העילי מהאגן הכללי בעונה הראשונה והשנייה בהתאמה. לעומת זאת, נפח הנגר העילי מתת-אגן R (אזור מגורים בעל שטח דומה לזה של תת אגן L (6.2% מהאגן הראשי) היה 5.8/5.5% מסך תנובת האגן הכולל בעונת הגשמים הראשונה והשנייה בהתאמה, כלומר פחות ממחצית מזו שנמדדה במוצא תת אגן L.

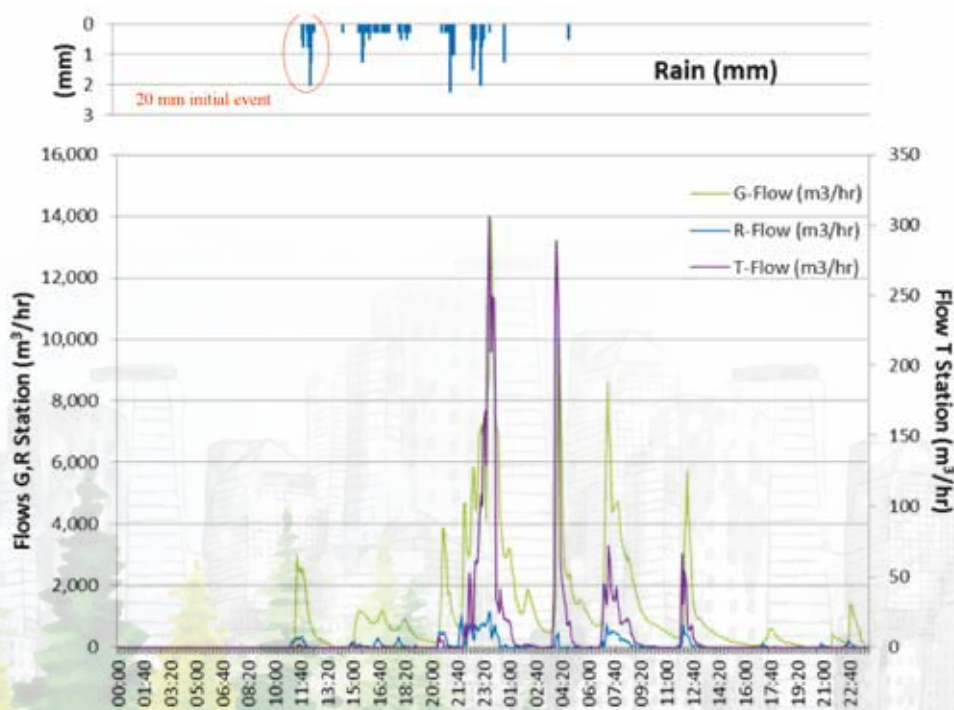
ההבדלים בנפחי הנגר העילי משני תתי האגנים נובעים כנראה מיחס השטחים הבלתי חדירים לסך שטח האגן. יש לציין שתת אגן הכביש בעונת הגשמים הראשונה הניב נפח נגר הדומה לחלקו היחסי משטח האגן, וזאת משום שהמדידות בעונת הגשמים הראשונה החלו בתחילת דצמבר ללא הכמויות הגדולות שירדו בחודשים אוקטובר ונובמבר 2015 (215 מ"מ). בעונת הגשמים השנייה הניב תת אגן הכביש (T) נפח נגר כפול מחלקו היחסי בשטח לעומת האגן כולו כמצופה מתת אגן אטום לחלחול מים שכזה.

טבלה 3: השוואת כמויות נגר לעומת שטח בין שתי עונות הגשמים שנמדדו

עונת גשמים	האגן הראשי (G)	תעשייה זעירה (L)	מגורים (R)	כביש (T)	גשם (מ"מ)
שטח	100%	6.9%	6.2%	0.2%	
* 2015-2016	100%	12.4%	5.8%	0.2%	360 (575) *
2016-2017	100%	15.9%	5.5%	0.4%	481

* עונת הגשמים הראשונה נמדדה מחודש דצמבר 2015 בלבד

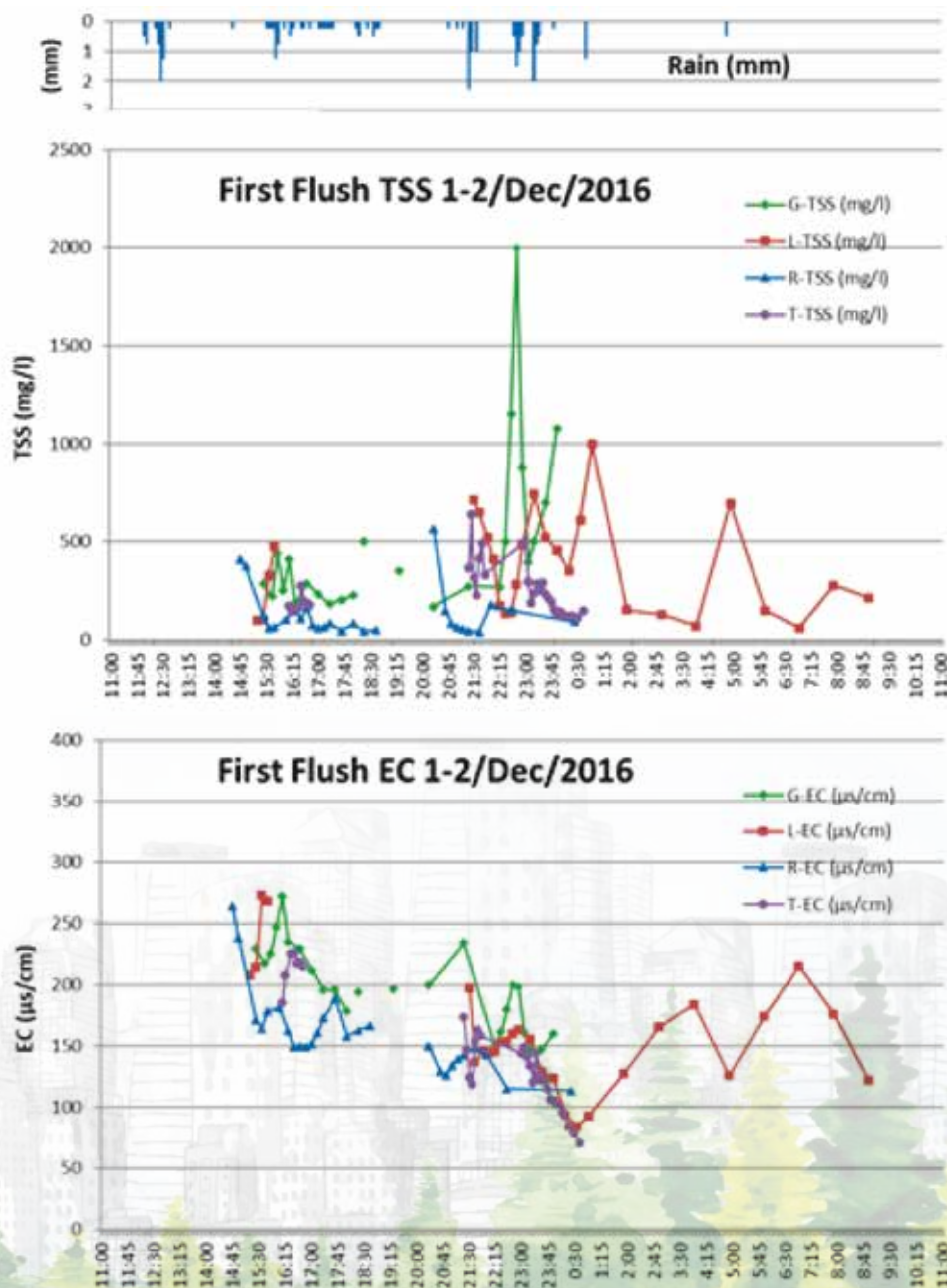
עונת הגשמים 2016-2017 החלה עם גשם ראשון מאוחר יחסית ב-1-2 לדצמבר 2016 עם 110 מ"מ גשם שהחלו עם מטח ראשון של 20 מ"מ ובעקבותיו מטח נוסף של 90 מ"מ אשר אפשרו איסוף מי נגר פעמיים במהלך יממה ומחצה זו (איור 14). המטח הראשון בן 20 מ"מ הניב נפח נגר של 8,000 מ"ק במוצא האגן הראשי (G) ורק 1.5 מ"ק של מי נגר במוצא תת אגן הכביש (T). אבל המטח השני הגדול בן 90 מ"מ לאורך 24 השעות הבאות הניב 44,200 מ"ק במוצא האגן הראשי (G) וכמות נכבדה בת 430 מ"ק במוצא תת אגן הכביש (T) עם ספיקה של 14,000 מ"ק לשעה במוצא האגן הראשי (G) וספיקה של 300 מ"ק לשעה במוצא תת אגן הכביש (T).



איור 14: הידרוגרף הגשם הראשון ב-1-2 לדצמבר 2016

לגשם הראשון (first flush) עשויה להיות חשיבות מיוחדת, ובעונת הגשמים הקודמת 2015-2016 הגשם הראשון הופיע ב-7 באוקטובר בטרם תחנות האיסוף והמדידה היו במקומן. בעונה זו, ניתנה לנו ההזדמנות לברוק לעומק את המזהמים שהגשם הראשון שטף עמו. אירוע הגשם הקטן הראשון בן 20 מ"מ בראשון בדצמבר 2016 הניב רמת מוצקים מרחפים (TSS) של 500 מג"ל ומוליכות חשמלית (EC) של 270 מיקרו סימנס לס"מ.

אירוע גדול יותר בן 90 מ"מ, שהגיע אחריו, שטף מהקרקע רמות מוצקים מרחפים (TSS) של עד 2,000 מג"ל אבל עם רמת מוליכות חשמלית (EC) נמוכה יותר (איור 15). רמות המוצקים המרחפים (TSS) הגבוהות ביותר נמדדו במוצא האגן הראשי (G) ולאחריו תת-אגן התעשייה הזעירה (L). תת-אגן המגורים (R) ותת-אגן הכביש (T) הניבו את רמת המוצקים המרחפים (TSS) והמוליכות החשמלית (EC) הנמוכה ביותר.



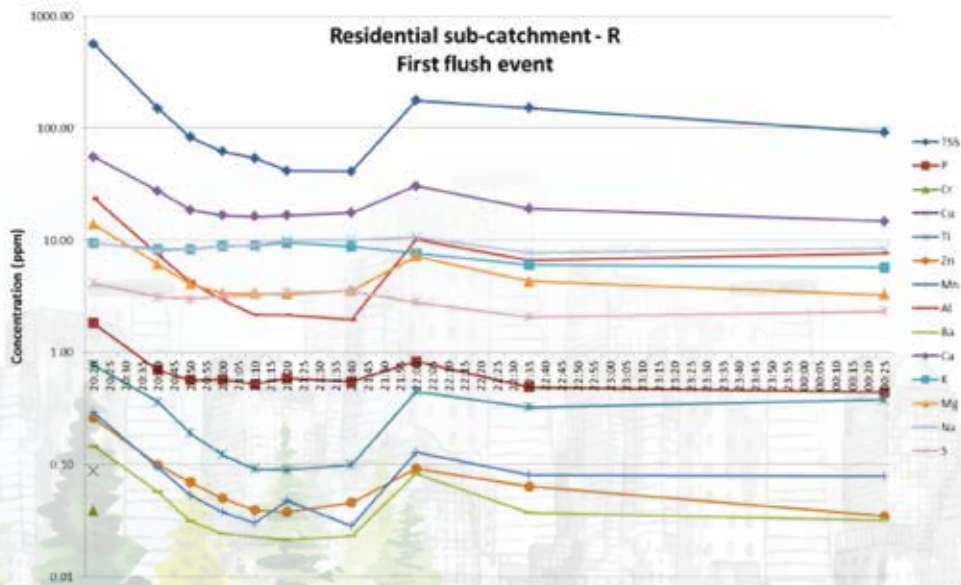
איור 15: TSS, EC פולוטוגרף של הגשם הראשון ב-1-2 לדצמבר 2016

החלק המסיבי של הגשם הראשון שירד בלילה שבין הראשון לשני בדצמבר 2016, עם ממטרים של 90 מ"מ גשם, הניב ספיקות של מעל 14 אלף מ"ק לשעה במוצא האגן הראשי ושטף עמו ערכים גבוהים במיוחד של מגוון מזהמים

(איור 15). עבור מספר מזהמים נמדד בגשם הראשון הערך הגבוה ביותר בעונת גשמים זו. (Al) אלומיניום (ערך מקסימלי מותר של 0.20 מג"ל עבור מי שתייה על פי התקן האמריקאי, האירופאי והישראלי), הגיע לרמה של 165 מג"ל במוצא האגן הראשי (G) ולרמה של 21 מג"ל בדקות הראשונות של זרימת הנגר במוצא תת-אגן המגורים (R) ותת-אגן הכביש (T). (Mn) מנגן (ערך מקסימלי מותר של 0.05 מג"ל עבור מי שתייה לפי התקן האמריקאי והאירופי, ו-0.20 מג"ל לפי תקנות מי השתייה בישראל), הגיע לערך של 0.80 מג"ל במוצא האגן הראשי (G) ותת-אגן התעשייה הזעירה (L), ולרמה של 0.30 מג"ל המוצא תת-אגן המגורים (R) ותת-אגן הכביש (T).

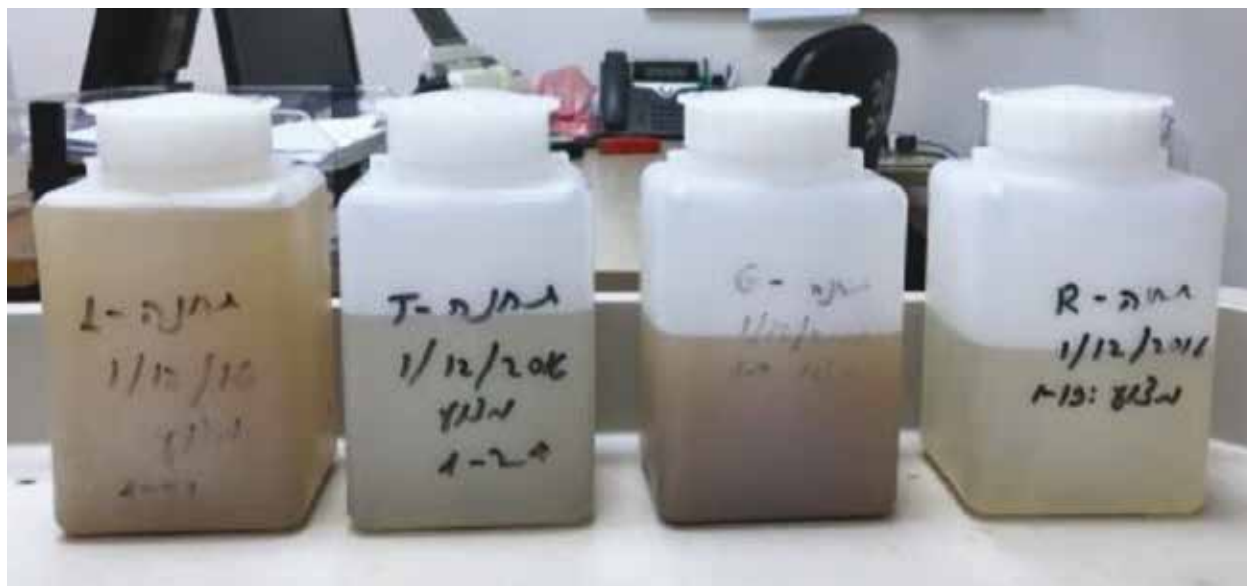
למרות שלסידן ומגנזיום אין ערכים מותרים מוגדרים למי השתייה, הם מהווים קטיונים עיקריים במי שתייה טבעיים ולכן מגדירים את קשיות המים. בעוד נוכחות סידן במי השתייה נקשרת לטעם טוב של המים, ההשפעה של מגנזיום על הטעם עדיין לא ברורה (Paltikanov 2013). ה-EPA האמריקאי עדיין לא קבע סטנדרטים של קשיות בנוכחות של סידן או מגנזיום, אבל מקובל בארה"ב שכאשר קשיות המים מגיעה לרמה של 150 מ"ג CaCO₃ לליטר, יש לטפל במים על מנת למנוע חריגה מעבר לערך זה. בישראל, משרד הבריאות שוקל הוספת מגנזיום למי השתייה על מנת להשיבו למי השתייה ברמות של 20-30 מג"ל לאור השימוש הגובר במים מותפלים כמי שתייה.

כל אחד מאירועי הגשם בעונת הגשמים האחרונה הניב סידן ומגנזיום מכל אחד מתתי-האגנים. הערך הגבוה ביותר התקבל במוצא האגן הראשי (G) ותת-אגן הכביש (T) עם ערכים של 105 ו-104 מ"ג בהתאמה סידן לליטר וערכים של 31/27 מגנזיום לליטר בהתאמה. הערכים שנמדדו עבור תת-אגן התעשייה הזעירה (L) והמגורים (R) היו ברמות דומות של 70/55 מ"ג סידן לליטר וערכים של 18/14 מ"ג מגנזיום לליטר בגשם הראשון.



איור 16: פולוטוגרף של הגשם הראשון ב-1-2 לדצמבר 2016 עבור מבחר מזהמים

תצפית על בקבוק המיצוע (EMC) של מי הנגר מארבעת האגנים כפי שנאספו בגשם הראשון (איור 17)



איור 17: מי הנגר מהגשם הראשון עבור כל אחד מהאגנים המנותרים

איכות מי הנגר

הרכב מי הנגר שהתקבל מהאירועים שנדגמו עד כה, מצביע על ריכוזים גבוהים יחסית של מגוון חומרים במים שחלקם מוגדרים כמזהמים. הריכוזים הגבוהים ביותר התקבלו עבור סידן, מגנזיום, ברזל, נתרן, אלומיניום, ניקל וסליקה המרכיבים את הסדימנטים המוסעים במי הנגר. הרכב יסודות אלה משתנה תלות בסוג הקרקע המקומית ובמקרה של כפר-סבא בשכבה עליונה המכילה ריכוז גבוה של חרסיות, עובדה המסבירה את הצבע החום בר"כ של מי הנגר בתעלת G וגם את הריכוזים של האלמנטים הנ"ל.

בר"ח זה נציג וננתח את מיצוע (EMC) התוצאות שהתקבלו בשתי עונות הגשמים שנדגמו עד כה. לשם כך התמקדנו ב-13 יסודות (זרחן - P, כרום - Cr, נחושת - Cu, אבץ - Zn, טיטניום - Ti, מנגן - Mn, אלומיניום - Al, בריום - Ba, סידן - Ca, אשלגן - K, מגנזיום - Mg, נתרן - Na וגופרית - S). ריכוז המוצקים המרחפים (TSS) והמוליכות החשמלית (EC) של מי הנגר שימשו כמדדים כללים לאיכות הנגר העילי (טבלה 4).

טבלה 4: נתוני ריכוז מזהמים ממוצע (EMC) לשתי עונות הגשמים שנמדדו

עונה	אגן	TSS	*EC	P	Ti	K	S	Al	Ca	Mg	Na	Ba	Cu	Cr	Zn	Mn
2015	G	356	207	1.15	0.92	6.03	3.74	26.87	38.77	12.28	13.65	0.10	0.04	0.18	0.18	0.32
	L	257	159	0.40	0.63	4.28	3.38	15.94	41.74	8.01	10.86	0.08	0.02	0.08	0.14	0.19
	R	223	139	0.50	0.40	4.61	3.60	9.23	36.00	7.63	9.75	0.06	0.03	0.01	0.16	0.14
2016	T	250	121	0.27	0.40	3.08	2.64	9.14	50.24	11.25	8.35	0.23	0.02	0.01	0.19	0.14
	G	805	193	2.09	1.25	10.0	4.69	54.34	41.73	14.31	16.03	0.16	0.16	0.07	0.25	0.62
	L	331	173	0.50	0.72	5.62	5.00	20.22	45.57	9.49	16.22	0.10	0.10	0.04	0.36	0.22
2017	R	88	86	0.30	0.20	4.24	2.62	4.30	17.47	3.69	7.24	0.03	0.03	0.01	0.08	0.05
	T	186	105	0.29	0.26	3.10	3.13	5.95	38.60	7.91	7.46	0.05	0.05	0.01	0.17	0.10

* כל הנתונים ביחידות של (מ"ג לליטר) למעט EC ביחידות של (מיקרו סימנס לס"מ)

ריכוז ה-TSS שנמדד במוצא האגן הראשי G בעונה השנייה יותר מכפול מהעונה הראשונה ובהתאם גדל הריכוז של כל שאר המזהמים הנספחים למוצקים המרחפים (למעט כרום). גידול בריכוז ה-TSS בין העונה הראשונה לשנייה נמדד גם במוצא תת-אגן התעשייה הזעירה L. לעומת זאת ירידה בריכוז ה-TSS בין העונות נמדדה הן במוצא תת-אגן המגורים R והן במוצא תת-אגן הכביש T. הסבר אפשרי לעלייה בתת-אגן התעשייה הזעירה הוא השינוי שאיזור התעשייה עובר מבתי מלאכה למרכזי קניות וחניות הבנויות מאספלט. ולעומת זאת תת-אגן המגורים שבו מתבצע תהליך הפוך של הקמת גני משחקים לילדים עם גינון ומדשאות. ירידה בערכי המוליכות החשמלית EC בין העונה הראשונה לשנייה נמדדה בכל האגנים.

ריכוזים גבוהים של זרחן P וטיטניום Ti נמדדו במוצא תת אגן L (טבלה 4) בהשוואה לתתי האגנים האחרים. את הערכים הגבוהים במוצא תת אגן L ניתן לייחס לתעשייה הזעירה הנמצאת בתת אגן זה (למשל, טיטניום דו חמצני משמש כפיגמנט לצבע, נייר וחומרים פלסטיים לרבות סגסוגות טיטניום המשמשות לבנייה של שילדות כלי רכב וממסרים מכניים). ריכוזים ניכרים של אבץ, שמקורו בעיקר מבלאי של צמיגים ורפידות בלמים ברכבים או שריפה של שמני סיכה, נמדדו במוצא תת אגנים L ו-T (טבלה 4). מקור נוסף של אבץ יכול להיות קילוף של צבע גגות ומעקות מגולוונים. הריכוזים הנמוכים של כרום Cr, ונחושת Cu, שמקורם בתעשיית האלקטרוניקה, ריתוך, צנרת מים בלחץ, צבעים, מעכבי חימצון, שנמדדו במוצא אגנים L ו-T מצביעים על כך שהפעילות התעשייתית בתת אגן L והתחבורה בתת אגן T לא פולטים יסודות אלה לסביבה.

איכות מי הנגר בהשוואה לתקני איכות מים בארץ ובעולם

למרות הסיכון בהשוואת הממוצע העונתי EMC של המזהמים, שכן ערכים גבוהים של מזהמים נמדדים בתחילת הסופה שהולכים ויורדים במהלכה, נבצע השוואה של מספר מזהמים לתקנות הישראליות לאיכות מי השתייה, השקיה והזרמת מים לנחלים.

מיצוץ (EMC) של Cr, Mn, Al, Cd מזהמים משמעותיים מארבעת האגנים עבור שתי עונות הגשמים שנמדדו נבחנו אל מול תקני המים. ריכוז האלומיניום Al נמצא גבוהה בשני סדרי גודל מתקנות מי השתייה האמריקאי, האירופאי והישראלי שהיינו 0.20 מג"ל (איור 18 מימין למעלה). בלט במיוחד ריכוז האלומיניום הממוצע העונתי בעונת הגשמים השנייה שהגיע לרמה של 54 מג"ל במוצא האגן הכללי G. ערכי האלומיניום הנמוכים ביותר נמדדו במוצא תת-אגן המגורים בעונה השנייה 4.30 מג"ל אשר עדיין משמעותית מעל הריכוז המותר בתקנות. אלומיניום

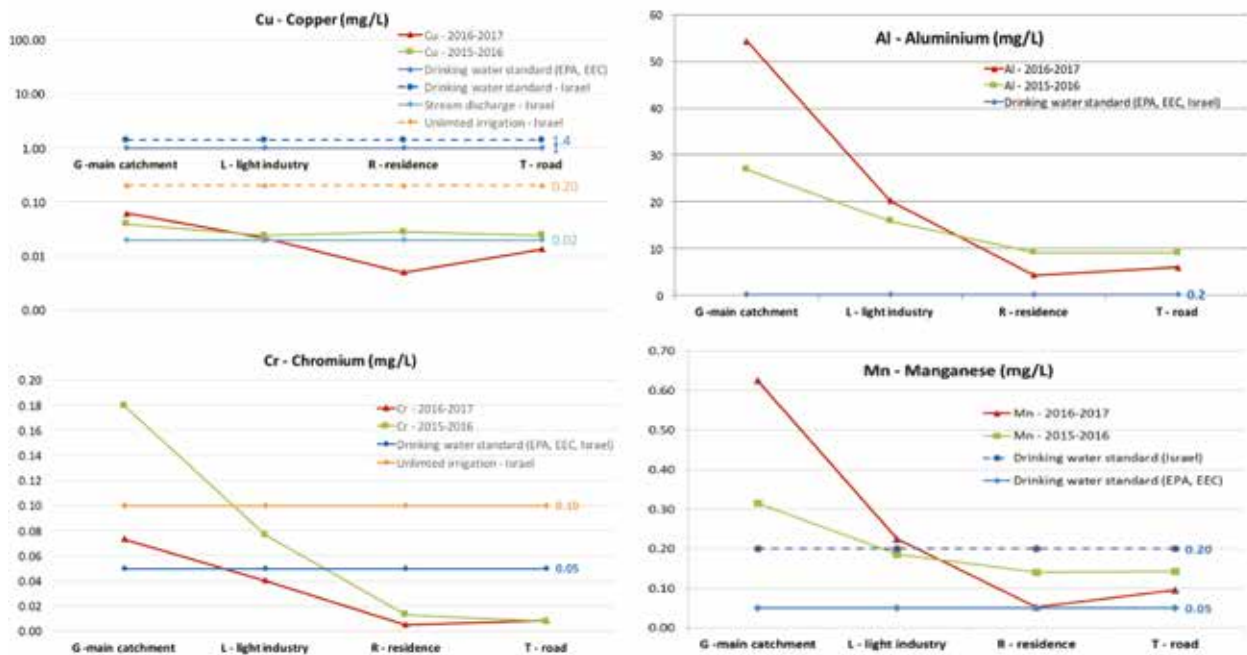
במי נגר עירוני היינו תולדה של חומרי בניין כגון פח מגולוון, קירוי ומרזבים, חומרים נפוצים במזרח כפר סבא כמו גם בערים אחרות בישראל הנמצאות בשלבי פיתוח וגידול.

ריכוזי מנגן Mn שנמדדו במוצאי האגנים היו גם הם מעל המותר בתקן האמריקאי והאירופי (0.05 מג"ל) ואף בחלקם מעל המותר בתקן הישראלי (0.20 מג"ל) (איור 18 מימין למטה). בעוד שבמוצא תתי-אגן המגורים R והכביש T נמדד ריכוז מנגן נמוך מהריכוז המרבי המותר בתקן הישראלי, הריכוז הנמדד במוצא האגן הכולל G היה מעל הריכוז המקסימלי המותר בשתי העונות. מנגן ידוע כמזהם הנמצא בריכוזים גבוהים מתשטיפי כבישים כמוצר לוואי של חלקי מנוע, למרות שבמיצוץ EMC שתי העונות שנדגמו נמדדו ערכי מנגן מת-אגן הכביש נמוכים מהמותר בתקן הישראלי, הרי שבדקות הראשונות של הגשם הראשון בדצמבר 2016 נמדדו ערכי מנגן בריכוז של 0.36 מג"ל (איור 18 מימין למטה) מעל המותר בתקנות הישראליות.

ריכוז הכרום Cr המותר במי השתייה לפי התקן האמריקאי, האירופי והישראלי היינו 0.05 מג"ל ואילו הריכוז המקסימלי המותר לפי התקן הישראלי להשקיה היינו 0.10 מג"ל (איור 18 משמאל למטה). ריכוז הכרום הממוצע EMC בשתי עונות הגשמים במוצא תתי-האגנים של המגורים R והכביש T היה נמוך מהשניים, למרות שכרום ידוע כתוצר לוואי של צלחות מתכת וחלקי מנוע בתשטיפי כבישים. יש לציין שגם בגשם הראשון שבו נמדדו ערכי ריכוז הכרום הגבוהים ביותר, לא עבר ריכוז הכרום הנמדד במוצא תתי-אגן הכביש את הריכוז המרבי המותר בתקנות. לעומת זאת, ריכוז הכרום במוצא האגן הכולל G בעונה השנייה היה מעל המותר בתקנות מי השתייה אך מתחת לתקנות מי ההשקיה.

נחושת במי נגר עירוניים נפוצה ומקורות רבים לה, כולל חלקי מנוע ובלמי רכב בתשטיפי כבישים, קוטלי חרקים ופטוריות בשימושים ביתיים ובגינות ציבוריות ואף כתוסף בחומרים לציפויי גנות. ועל כן חישבנו את ריכוז הנחושת Cu הממוצע EMC מכל האגנים בשתי העונות הנמדדות לתקני מי השתייה, ההשקיה וההזרמה החופשית לנחלים (איור 18 משמאל למעלה). כולם, ללא יוצא מן הכלל, נמצאו מתחת לתקן, אפילו עבור מי הנגר מהגשם הראשון בו נמדדו הערכים הגבוהים ביותר בעונה.

מחזור המים העירוני



איור 18: השוואת ריכוזים עונתיים של Al, Mn, Cr, Cu לתקני המים השונים

מסקנות על סמך התוצאות המדודות לאחר שתי עונות גשמים

- א. האגן הנבחר במזרח כפר סבא שגודלו 2,785 דונם עם מקדם נגר השווה ל- 0.22-0.24 ייצר 336 אלף מ"ק של מי נגר בעונת הגשמים 2016-2017 עם גשם בעובי 481 מ"מ בלבד. ובהשלכה על העיר כפר סבא כולה, עם שטח כולל של 14.17 קמ"ר (14,170 דונם) וגשם ממוצע של 550 מ"מ, צפוי להניב מי נגר בכמות של כשני מיליון מ"ק מים בשנה.
 - ב. אזור תעשייה זעירה במזרח כפר סבא מניב כמעט פי 2 יותר נגר משכונת מגורים בעלת שטח דומה.
 - ג. אזור תעשייה זעירה בכפר סבא מכיל טביעת אצבע של זרחן וטיטניום לרבות חיידקי E. coli שמקורו יכול להיות מגלישות ביוב או מחיבור צולב של רשת הביוב והניקוז.
 - ד. מי הנגר שנדגמו בסופות שנוטרו בכל התחנות בכפר סבא לא עמדו בדרישות באף תקן איכות מים מוכר בישראל.
 - ה. מי הנגר בכפר סבא מזוהמים פי 2 יחסית לערים באוסטרליה ובקנדה, אך בעלי ערך דומה לערים עם אקלים דומה במערב ארה"ב וערים אחרות בישראל כגון הרצליה ואשדוד.
 - ו. מי הנגר הנשטפים מכביש-55 במזרח כפר סבא נמצאו נקיים יותר יחסית לתשטיפי כבישים בארץ ובעולם.
- מהמדירות עד כה מסתמן שמי הנגר בכפר סבא מצריכים טיפול בטרם יהיה ניתן לעשות בהם שימוש כלשהו.

המשך מחקר

א. בעונת הגשמים הבאה יבוצע מאמץ לאסוף ולייצר בקבוק מיצוץ EMC על מנת לבצע אנליזות להן יש חלון זמנים מוגדר כגון: חנקן, TOC, וחיידקים פתוגניים (E. coli, קולי צואתי וכד'), לאחר שבעונת הדיגום השנייה בוצעו אנליזות כאלה ל-4 אירועי גשם בלבד.

ב. הרחבת האנליזה למזהמים נוספים כגון: ניטראט, ניטריט, זרחן מומס, SO_4 , PO_4 , TN עבור תוצאות הדיגום בעונה השנייה והשלישית.

ג. הרחבת האנליזות לניתוח פילוג גורל חלקיקים בכל הסופות של עונת הגשמים השלישית כולל אנליזות התוצאות של הסופות שבהן בוצעה המדידה בעונת הגשמים השנייה.

ד. אפיון מפורט יותר של שימושי הקרקע בתתי האגנים לרבות האגן הכללי ובחינת התוצאות המדודות לאור אפיון זה.

במהלך עונת הגשמים 2015-2016 נדגמו ונוטרו עד כה (סוף מרץ) 18 ימים של אירועי נגר. נפח הנגר שנמדד במוצא אגן הניקוז כולו במוצא של האגנים, הבקר ידע לעצור את הדוגם ולאתחל את התוכנית הדיגום מההתחלה, דבר שאפשר דיגום ברזולוציה גבוהה לכל אירועי הנגר הנדגמים ולא רק לאירוע הראשון כפי שמתקיים כיום.

ה. דיגום זה יאפשר גם ביצוע אנליזות להן יש חלון זמנים מוגדר כגון: חנקן, TOC, וחיידקים פתוגניים (אי-קולי, חיידקים צואתיים וכד').

ו. דיגום תלוי נפח שיאפשר ביצוע EMC מיד עם קבלת הדוגמאות.

ז. הרחבת האנליזה לאנליזות נוספות כגון: ניטראט, ניטריט, זרחן מומס, SO_4 , PO_4 , TN

ח. עם סיום עונת הגשמים פירוק ואחסון הציוד לתקופת הקיץ והתקנתו לקראת עונת הגשמים הבאה.

ט. ניתוח של כל הסופות שנמדדו במהלך שנת המחקר הראשונה.

י. אפיון מפורט יותר של שימושי הקרקע בתתי האגנים לרבות האגן הכללי ובחינת התוצאות המדודות לאור אפיון זה.

שער 2

תכנון ועיצוב עירוני רגיש מים

מתן פתרונות משולבים לתכנון עירוני רגיש מים חדשני





פרויקט 2.1: בחינת פתרונות משולבים לתכנון עירוני רגיש מים

1. מבוא

התכנון ההנדסי שהיה נהוג בישראל במשך עשרות שנים, בדומה לנהוג בארצות רבות אחרות, ראה בנגר העילי העירוני מטרד או בעיה הדורשת פתרון. בתכנון לקוי, מי הגשם עלולים לגרום להצפות של הכבישים, וחדירה של מים לתת-הקרקע סמוך ליסודות הבניינים עלולה להביא לפגיעה ביציבותם. מערכות הניקוז תוכננו בדרך כלל במטרה לאסוף את מרבית מי הגשם ולסלק אותם במהירות וביעילות האפשרית מהמרחב הבנוי. במרבית הישובים, מי הגשם מגיעים בסופו של דבר אל ערוצים טבעיים ומשם, לא אחת, אל הים. בשנים האחרונות התגבשה הבנה, בין היתר בעקבות מחקרים בחו"ל, כי רצוי לנקוט בתכנון עירוני רגיש למים (תר"מ), המבטא יעוד שונה למים ומיישם אמצעים אחרים לשם כך.

פוטנציאל הנגר העילי הבלתי מנוצל בערי ישראל מוערך ב-100-70 מיליון מ"ק בשנה. מים אלו הם משאב אשר בתכנון נכון ניתן להפיק ממנו תועלת. בראש ובראשונה, ניתן לאגום אותם ולהחזיר אותם אל מאגר מי התהום, אם אינם מזוהמים יתר על המידה. מערכות של ביו-פילטרים, המהוות את מושא המחקר של צוותי מחקר אחרים בפרויקט, מאפשרות לשמר חלק מהמים האלה. אולם בתכנון נכון, מי הנגר העילי עשויים גם לתרום לאיכות החיים של תושבי העיר: ניתן להשתמש בהם להשקיה של צמחייה בגנים עירוניים קטנים ובערוגות, בתנאי שמוסותים את מהירות הזרימה ומסיטים אליהם את המים בצורה מושכלת. הצמחייה עשויה לשפר את הנוחות האקלימית של הולכי רגל בשטחים הפתוחים הסמוכים, ולהפחית את צריכת האנרגיה של בניינים למיזוג אוויר. המחקר הנערך על ידי הצוות במכונים לחקר המדבר משתלב בתוכנית מקיפה המיועדת להביא ליצירת ערים רגישות מים בישראל אשר ייטיבו לנצל את המשאב הזה.

התרומה של צמחייה לנוחות התרמית של הולכי רגל בעיר ולהפחתת צריכת האנרגיה בבניינים תלויה במיני הצמחים, במיקום שלהם במרקם העירוני ובאופן שבו הם משולבים בשאר מרכיבי הרחוב. את הצמחייה אפשר לשלב במספר אופנים: בגינות ציבוריות או פארקים שכונתיים; ברחובות; בגינות הבניינים; או על גבי הבניינים עצמם, בעיקר בגגות. התכנון חייב להביא בחשבון הן את מאפייני הסביבה הבנויה והן את מאפייני האקלים, ובפרט את תפוסת המשקעים: מספר ימי הגשם מועט, העוצמות לעיתים גבוהות מאוד, ובעיקר – ישנה תקופת יובש ארוכה וקשה מאוד הנמשכת מספר חודשים בשנה. האקלים בארץ שונה מאוד מהאקלים השורר באחדות מהערים החלוצות בתחום, כגון מלבורן שבאוסטרליה ופורטלנד בארה"ב. לכן אפשר שהכלים המשמשים את המתכננים שם לא יתאימו לצרכים בישראל.

מטרות הפרויקט שעליו אחראית הקבוצה שלנו הן אפוא: א) לבחון, בהקשר הישראלי, כיצד ניתן למפות מערכת משולבת ומקיפה של נתיבי מים, אזורי איגום ומתקני אגירה וטיפול לנגר עילי במרקם עירוני קיים; ב) לפתח ולהדגים מתודולוגיה ליישום אמצעים לשימור נגר עילי במרחב העירוני במגמה להביא לניצול מיטבי של המים לשיפור הנוחות התרמית של הולכי רגל ברחוב ולהפחתת בצריכת האנרגיה של בניינים לאקלום.

2. שיטות

המתודולוגיה של הפרויקט נשענת על הדמיות מחשב, וכוללת שני מאמצי מחקר הבאים לענות על מטרות הפרויקט, בהתאמה:

א. מיפוי אלמנטים של עיר רגישה למים. התהליך כולל את השלבים הבאים:

1. רכישה של בסיס נתונים בעל רזולוציה גבוהה, ממופה בממ"ג (GIS).
2. מיפוי נתיבי זרימת נגר עילי, באמצעות תוכנת SUSTAIN (המבוססת על מנוע החישוב SWMM).
3. הגדרת יעדים כמותיים למהלך ההתערבות במרקם העירוני.
4. ניתוח משולב של הזרימות ושל התשתית במטרה לזהות אתרים אפשריים ליישום אמצעי בקרת נגר, לפי הסיווג הבא: סוג האמצעי; צורת הפרישה שלו; מיקום האמצעי; סוגי הצמחייה.
5. הדגמת המתודולוגיה בשתי ערים בארץ.

ב. בחינת השפעתם של אמצעים לבקרת הנגר על אקלים העיר, בשלבים הבאים:

1. מודל של השפעות האמצעים לבקרת הנגר על מיקרו-אקלים העיר, ובפרט: טמפרטורת קרקע בעיר לאחר הגשם, עם או בלי צמחייה; ומודל מחשב של טמפרטורת האוויר באזור עירוני.
 2. שילוב ההדמיות של השפעת הצמחייה במודל CAT, ואימות המודל המשולב על בסיס נתוני מדידות קיימים מהערים אדלייד, גוטבורג ומלבורן.
 3. שילוב (חד-כיווני) של מודל CAT בבסיס נתונים קיים ב-GIS.
 4. ניתוח ההשפעה של הצמחייה באמצעי בקרת הנגר על נוחות תרמית של הולכי רגל באמצעות מדד ITS.
 5. ניתוח ההשפעה של הצמחייה באמצעי בקרת הנגר על צריכת אנרגיה לאקלום באמצעות תוכנת Energy+
- המוזנת בנתוני אקלים אשר הותאמו לתנאי העיר באמצעות מודל CAT המשופר.

3. תוצאות, דיון ומסקנות

במהלך השנה השנייה של הפרויקט הושגה התקדמות במספר נושאים, אשר יתוארו כאן בקצרה.

3.1 ניתוח הידרולוגי של סביבות עירוניות

מידול הידרולוגי של סביבות עירוניות היינו נושא מורכב בשל ההטרוגניות של המערכת הכוללת בנוסף לתנאים הסביבתיים כגון סוג קרקע, תכנית, שיפועים, משקעים והתאדות (הנדרשים במידול הידרולוגי בשטחים פתוחים), גם

מאפיינים הייחודיים לשטחים עירוניים כגון רשת ניקוז תת-קרקעית, שטחים בנויים אטומים למים ותכסית מגוונת. בנוסף, קנה המידה של אגני ניקוז עירוניים שונה לחלוטין מאילו של שטחים פתוחים ויכול להגיע לסדר גודל של מטרים ספורים. אירועי הצפה בשנים האחרונות בשטחים עירוניים בארץ ובעולם מדגישים את ההכרח במציאת פתרונות כוללים לטיפול בנגר העילי כך שיהפוך ממטרד למשאב. על מנת למצוא מודל שיתאים לתנאים הספציפיים של ערים במדינת ישראל נעשתה סקירה מקיפה של מודלים לניתוח ההידרולוגיה העירונית (Salvadore et al., 2015). הסקירה כללה בחינה של היתרונות והחסרונות של מרבית המודלים הקיימים בעולם. מודלים אלו מאפשרים להריץ סימולציות הידרולוגיות אשר לוקחות בחשבון משתנים שונים של נגר עילי, כולל משתנים הייחודיים לסביבות עירוניות (כגון גגות ירוקים וריצוף חדיר למים). כמו כן ניתן לשלב בסימולציות אמצעים שונים לניהול נגר עילי כגון פתרונות מגישת LID (Low Impact Development – פיתוח בעצימות נמוכה) הכוללים תיעול מי הנגר להשקיה ולהחדרת המים תוך שימוש בטכנולוגיות מקומיות.

אחד המודלים החשובים למיפוי ההידרולוגיה העירונית הוא מודל (Storm Water Management) SWMM Model). זהו מודל דינמי הידרולוגי-הידראולי שפותח בתחילת שנות ה-70 של המאה ה-20 על ידי המשרד להגנת הסביבה האמריקאי (EPA). המודל נמצא בשימוש נרחב, מעודכן באופן קבוע ובעל קוד פתוח המאפשר התאמה ופיתוח של פתרונות לבעיות ספציפיות. המודל מיועד למיפוי מקיף של מערכת נתיבי המים העירוניים העל והתת-קרקעיים ומידול של זרימת המים ופוטנציאל מי הנגר. המודל מאפשר סימולציות על בסיס אירועי גשם (היסטוריים וחזויים), מיפוי של אזורי איגום ומתקני אגירה, מיפוי של שימושי קרקע ותכסית קרקע (דרגת חדירות המשטח) ואינו מוגבל מבחינת קנה המידה וגודל האגן. המודל מאפשר הגדרה של פרמטרים רבים וניתן באמצעותו לאפיין מיקרו-אגנים ברזולוציות של מטרים בודדים, ולהתבסס גם על טופוגרפיה ונקודות גובה ברזולוציות גבוהות על מנת לכלול פרטים האופייניים לאזורים עירוניים (כגון מדרכות, קירות, סוללות וכדומה). כמו כן, ניתן למפות פיתוח בעצימות נמוכה (LID) על מנת להעריך את ההשפעות של תכנון עירוני על פוטנציאל מי הנגר כגון: שינויים בתכסית הצומח, ניתוב המים ואיגומם, שימוש בריצוף חדיר ואף גגות ירוקים. החיסרון הבולט של המודל נעוץ במורכבות שלו. על מנת להשיג תוצאות מהימנות יש להגדיר מגוון רחב של פרמטרים שלא תמיד נמצאים בהישג יד, וכן, נדרשים חישובים נרחבים. המודל נבדק על ידי הטכניון שמצא שחסרון זה משפיע על הדיוק בתוצאות (משהב"ש 2007).

קיימים מודלים רבים אחרים למידול של ההידרולוגיה עירונית ברמות שונות של מורכבות ושל רזולוציה מרחבית ועתית. כמו כן, פותחו גם תכנות מסחריות כגון: MUSIC ו-PCSWMM.

במחקר הנוכחי הוחלט להתמקד במודל ה-SUSTAIN (Shoemaker, 2009; 2011; 2013) מפני שהמודל הינו מודל נגיש, חינמי ובעל קוד פתוח המשלב מידול של נגר עילי עם מידול של המערכת התת-קרקעית (ספיקה ומזהמים), ואשר כולל גם רכיב לתכנון והערכה של פתרונות בעצימות נמוכה (LID) ורכיב לאופטימיזציה על בסיס של שיקולי עלות-תועלת (כגון עלות הקמה מול דרישות ספיקה).

מודל ה-SUSTAIN מאפשר מידול ברזולוציה מרחבית גבוהה המתאימה לאגנים קטנים מאוד המאפיינים סביבות עירוניות. כמו כן, המודל משתלב במערכת ArcGIS קיימת, ולכן מפשט ומיעיל את השימוש בנתונים מרחביים קיימים. המודל גם נבדק באזורים אקלימיים צחיחים וצחיחים-למחצה דומים לאלו של מרבית הערים בארץ (Sun et al., 2016) בדיוק המודל והתאמתו לתנאים הסביבתיים והעירוניים של ערים בארץ נעשו על בסיס אחד מתתי-האגנים בתחום העיר כפר סבא. בתת-אגן זה נאספים בשנים האחרונות נתונים רציפים של אירועי גשם ע"י קבוצת המחקר בראשותו של פרופ' רוני וולך (איור 19).



איור 19: תת-האגן הנבדק בתחום העיר כפר סבא על רקע DEM (Digital Elevation Model) שהופק מנתוני הטופוגרפיה הקיימים של העיר. רקע: ESRI World Map Background

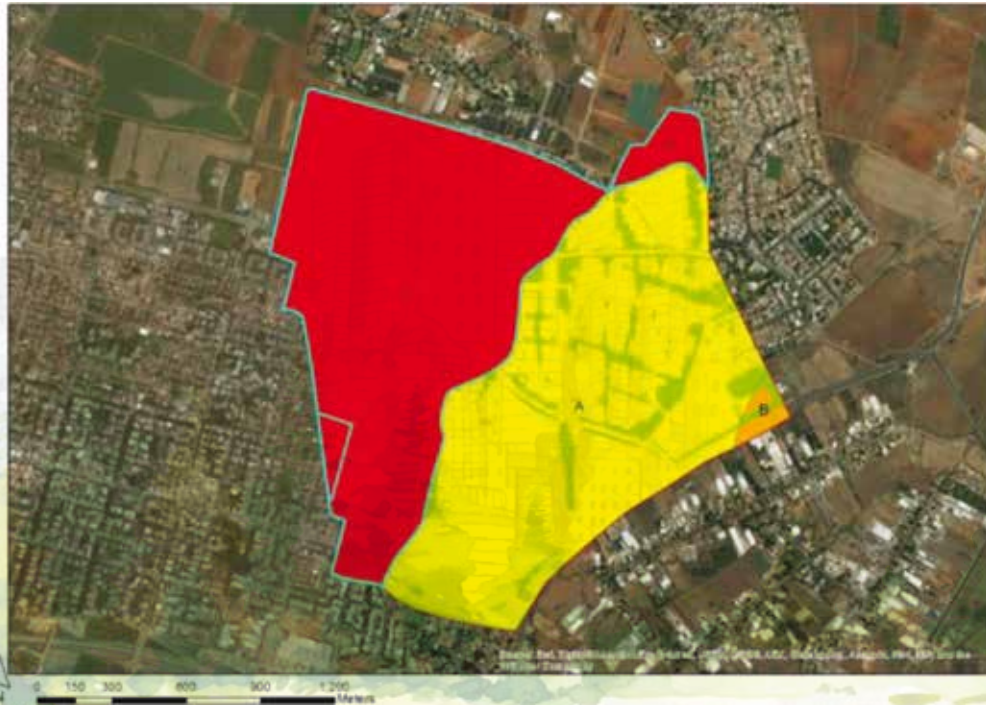
עיריית כפר-סבא סיפקה את הנתונים שכללו טופוגרפיה, שימושי קרקע, רשת הכבישים ומפת המבנים. נתונים נוספים התקבלו ממאגרי מידע פתוחים, למשל נתוני קרקע הורדו מאתר משרד החקלאות ונתוני מפלס מי התהום הורדו מאתר רשות המים. הנתונים עברו עיבוד ראשוני כך שיותאמו לדרישות המודל, למשל את סוגי הקרקעות צריך היה לסווג בהתאם לסיווג הידרולוגי המשקף את פוטנציאל הנגר שלהם ואת שימושי הקרקע צריך היה לסווג בהתאם לקוד שימושי הקרקע האמריקאי. כמו כן, צריך היה לסווג את סוגי התכסית על פי מידת האטימות של המשטח למים, למשל משטחי אספלט יקבלו ערך של 100%, כלומר משטחים אטימים לחלוטין.

לאחר התאמת הנתונים לדרישות המודל נבדק רכיב ה-BMP (Best Management Practice). רכיב זה מאפשר לזהות את המיקום האידיאלי של פתרונות שונים. המודל מאפשר גם להגדיר פתרונות מותאמים ספציפית כגון: ביו-פילטרים, תעלות החדרה, פסי צמחייה, גגות ירוקים ועוד. המשתמש מגדיר את תנאי הסף על פי התנאים הספציפיים הנדרשים, למשל, שיפוע מינימאלי, סוג קרקע נדרש, גודל אגן היקוות ומרחק מכבישים קיימים, ובאמצעות ניתוח רב-שכבתי ו-suitability analysis המודל ממפה את האזורים המתאימים ביותר למיקום מרחבי של הפתרונות הנבדקים (איור 20).

יש לזכור שלהגדרת תנאי הסף חשיבות מכרעת בתוצרי הניתוח המתקבלים (איור 21). אפשרות נוספת היא למקם פתרונות בשטח ולאחר מכן להעריך את היעילות של כל פתרון בהתאם לניתוח מרחבי של הנגר. ניתן לשלב אופטימיזציה של תהליך הניתוח כך שהמערכת מנתחת באופן איטרטיבי חלופות ותרחישים שונים בהתאם לשיקולי עלות-תועלת, למשל אופטימיזציה של שטח גג ירוק נדרש או של ריצוף חדיר. ניתן אף להעריך פיתוח עתידי באמצעות השוואה של התערבות בפתרונות בעצימות נמוכה למצב קיים או אף הערכה של כמויות הנגר ללא פיתוח עירוני כלל. המערכת כוללת בסיס נתונים של מחירי חומרי בנייה שונים אשר ניתן להתאים למחירים המקובלים בארץ או להגדיר עלות עבור יחידה כוללת, למשל, עלות הקמה של ביו-פילטר.



איור 20: זיהוי של אזורים המתאימים למיקום של פסי ושטחי צמחייה לאיסוף מי נגר על פי תנאי סף ספציפיים כגון טופוגרפיה קיימת, מידת חדירות המשטח ומרחק מכבישים קיימים
רקע: ESRI World Map Background



איור 21: השפעת סוג הקרקע על זיהויים של אזורים המתאימים למיקום של פסי צמחייה לאיסוף מי נגר. ניתן לראות שבסוג קרקע C (קרקע בעלת רמת חדירות נמוכה) לא מתקבלים פסי צמחייה
רקע: ESRI World Map Background

אחד החסרונות העיקריים במודל ה-SUSTAIN הוא העובדה שהוא מתבסס על מערכת ה-ArcGIS כלומר נדרש פיתוח מתמיד של המודל על מנת לשדרג אותו ולהתאימו לגרסאות החדשות של תוכנת ה-GIS.

הערה: לאחרונה החליט ה-EPA להפסיק את המשך השדרוג של המודל ולכן תיבדקנה חלופות נוספות שתאפשרנה לספק ניתוח כולל כדוגמת ה-SUSTAIN.

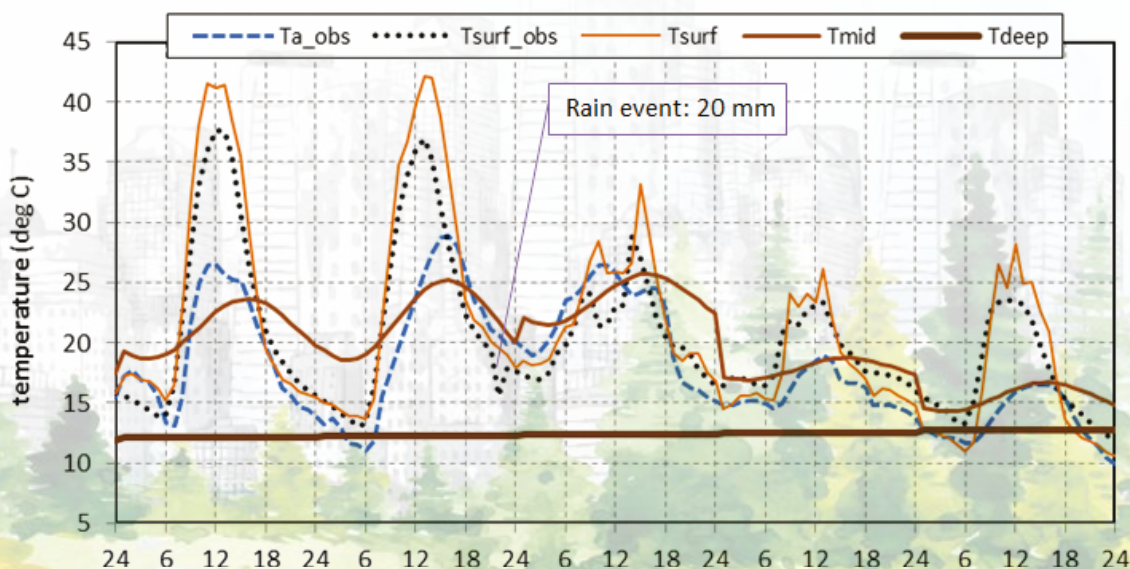
3.2. ניתוח תרמי של סביבות עירוניות

פיתוח הכלים לניתוח תרמי של סביבות עירוניות נעשה במספר שלבים:

3.2.1. בניית מודל לטמפרטורת פני קרקע

אחד הגורמים בעלי ההשפעה הרבה ביותר על מיקרו-אקלים בעיר הוא טמפרטורת פני הקרקע: היא משפיעה הן על טמפרטורת האוויר בקרבתה והן על מאזן הקרינה עם עצמים ובני אדם ברחוב. לנוכחות מים בשכבות העליונות של הקרקע (בעקבות אירועי גשם) ישנה השפעה על הטמפרטורה, אשר אותה יש צורך לאמוד באמצעות מספר נתונים קטן ככל האפשר אשר יהיה נגיש לכל מתכנן, ונתונים מטאורולוגיים סטנדרטיים בלבד. מודל כזה נבנה בפורמט המשלב אלמנטים ממספר מודלים קיימים, בהתאם לנתונים אשר צפוי כי יהיו זמינים לכל יעד בעיר. הוא נבחן בעזרת נתונים מטאורולוגיים ומדידות של פני השטח בשדה בוקר, ונמצא כי הוא נותן רמות דיוק טובות.

איור 22 מדגים את טמפרטורות פני הקרקע בשדה בוקר לאורך תקופה של כשבועיים, אשר במהלכה נרשם אירוע גשם משמעותי. בעקבות הגשם, השתנו תכולת הרטיבות של הקרקע והתכונות התרמיות שלה, ואל מאזן האנרגיה בפני השטח נוסף רכיב משמעותי של קירור באידי.



איור 22: מהלך הטמפרטורה של פני הקרקע בשדה בוקר לפי המודל ולפי מדידות בשטח

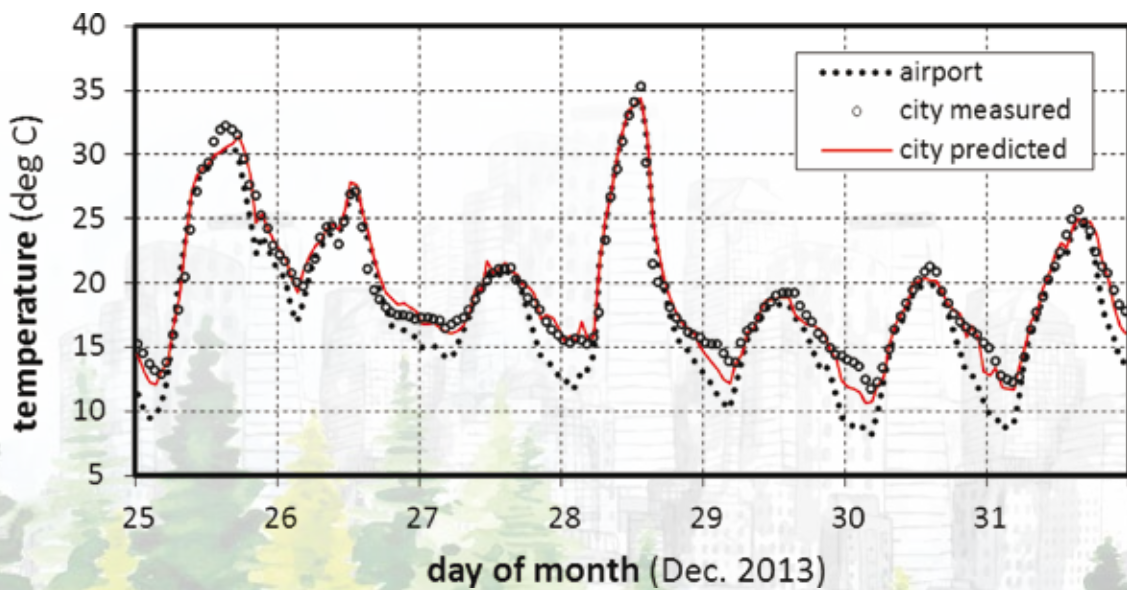
המודל תורגם לשפת מחשב FORTRAN ושולב בתוכנת CAT.

3.2.2 שכלול היכולת של מודל CAT לתאר את ההשפעות של קרקע לחה וכיסוי צמחייה על טמפרטורות האוויר בעיר

מודל CAT במתכונת הקודמת מבטא את השפעת הצמחייה באמצעות מקדם אמפירי המהווה חלק מהנוסחה לחישוב שטף החום המוחש. ערכו של המקדם הזה משתנה בהתאם למידת החשיפה של האוויר במעלה הרוח למשטחים תורמי לחות כגון גופי מים או צמחייה. יחד עם זאת, במודל אין ביטוי ישיר להשפעה אפשרית של הלחות בקרקע או של צמחייה בקניון העירוני. אחד היעדים המרכזיים בפרויקט הנוכחי היה אם כן שכלול מודל CAT באופן שיאפשר לבטא את ההשפעה של צמחייה ברחוב העירוני. לשם כך פותח מודל המאפשר לחשב את טמפרטורת פני הקרקע או צמחיית כיסוי הצמודה לקרקע (כגון דשא) בהתחשב בשינויי לחות הנובעים ממשקעים או השקיה. המודל אומת בעזרת נתונים שעתיים אשר התקבלו מהתחנה המטאורולוגית בקמפוס שדה בוקר ואשר מייצגים שנה שלמה (Leaf and Erell, 2017).

3.2.3 אימות מודל CAT המשופר בעזרת נתונים אמפיריים

מודל CAT בגרסה המשופרת, הכוללת חיזוי של טמפרטורת הקרקע בתנאי רטיבות משתנים ובכיסוי צמחייה נבחן בעזרת נתונים אשר התקבלו ממחקר אשר מתקיים באוניברסיטת מונש במלבורן¹. במסגרת מחקר זה, נמדדו לאורך תקופה ארוכה נתונים מטאורולוגיים במספר נקודות בכיכר עירונית במרכז העיר וברחובות הסמוכים לה. איור 23 מציג את הטמפרטורות החזויות לפי מודל CAT בהשוואה לטמפרטורות אשר נמדדו בפועל באחת מתחנות המחקר. קלט למודל שימשו הנתונים המטאורולוגיים בשדה התעופה של העיר, המרוחק כ-20 ק"מ ממקום ביצוע המחקר.



איור 23: מהלך טמפרטורת האוויר ברחוב במלבורן לפי מודל CAT המשופר ולפי מדידות בשטח

העיבוד של הנתונים שהתקבלו מצוות המחקר במלבורן עדיין לא הסתיים, ואפשר שבמודל CAT יוכנסו שיפורים נוספים אשר יאפשרו לבחון את השפעתה של השקיית הצמחייה בעיר ביתר פירוט. העבודה על החלק הזה במודל צפויה להסתיים בחודשים הקרובים.

3.2.4. בניית ממשק לקישור בין תוכנת CAT לבין ממשק ArcGIS, ופיתוח גרסה מרחבית של CAT

תוכנת CAT במתכונת הקיימת מבצעת הדמיה של טמפרטורת האוויר ופרמטרים מטאורולוגיים אחרים ברחוב עירוני על בסיס נתונים מדודים מתחנה מטאורולוגית תקנית מחוץ לעיר. לביצוע ההדמיה, נדרש תיאור של הגאומטריה והתכסית בתחנת הייחוס וברחוב. השילוב עם GIS יאפשר לבצע את הסימולציה באופן אוטומטי עבור מספר רב של נקודות בעיר במקביל, ולכן בניית ממשק לקישור בין תוכנת CAT לתוכנת GIS היא שלב חיוני בפרויקט.

עבור תיאור הגאומטריה של רחוב פותחה שיטה לחישוב גובה הבניינים הממוצע והרוחב הממוצע של כל רחוב בעזרת GIS. עבור תיאור התכסית נבנה ממשק אשר קורא את המידע על התכסית של פני השטח באופן מובנה מבסיס נתונים ב-GIS. מיפוי מדויק של כמות הצמחייה והמים באזורים עירוניים דורש נתונים ברזולוציה גבוהה וכיסוי מרחבי של כל אזור המחקר. תהליך המיפוי משלב נתוני חישה מרחוק ונתונים וקטוריים, ונעשה במספר שלבים: בשלב הראשון לצורך מיפוי התכסית השתמשנו בהדמיות Google-Earth. תהליך המיפוי עצמו בוצע ע"י יישום אלגוריתם maximum likelihood בתוכנת ArcGIS. אלגוריתם זה מחלק את הפיקסלים למספר קבוצות הנקבע ע"י המשתמש בהתאם למאפיינים הספקטראליים שלהם. בשלב השני, שילבנו את בסיס הנתונים הוקטורי (שכבות הבניינים והכבישים) תוך צמצום מספר הקבוצות ל-6 סוגי תכסית: (1) בניינים, (2) קרקע חשופה, (3) משטחים בלתי חדירים (כבישים, מגרשי חנייה וכו'), (4) צמחייה, (5) מים ו-(6) צל. כדי לזהות במדויק יותר צמחייה, נרכשו הדמאות לוויין (WorldView-2 (WV2) ברזולוציה של 2 מ' הכוללות אורכי גל בתחום הנראה והאינפרא אדום, אשר מאפשרים חישוב של אינדקס הצמחייה Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). הסיווג הסופי בוצע ע"י ניתוח רב שכבתי (overlay) בין ששת סוגי התכסית הנ"ל ובין פיקסלים שזוהו כצמחייה בהדמאות ה-NDVI. השלב האחרון כלל חישוב אחוז הכיסוי של צמחייה ומים עבור כל פוליגון רדיאלי.

ניתוח מרחבי-עיתי מתבסס במקרים רבים על ניתוח של ערכי ישויות ביחס לסביבה מוגדרת (neighborhood) או חיץ (buffer). במחקר זה נדרשת הגדרה של חיץ רדיאלי עבור מודל CAT, על מנת להתייחס לתכסית התורמת למאזן האנרגיה ולאדי המים באוויר בכל נקודה בהתאם לכיוון הרוח הרגעי וליציבות האטמוספירית. לשם כך פותח כלי ב-ArcGIS שמייצר באופן אוטומטי פוליגונים רדיאליים בהתאם למרחק ולזווית נתונים. המודל שפותח עבר מספר עדכונים על מנת לפשט ולייעל את המודל ולאפשר אוטומציה ופרמטריזציה מלאים של תהליך בניית המעגלים. המודל תורגם לכלי geoprocessing אינטגרלי (בשפת Python) ומקבל כקלט שכבת נקודות שלגביה מתבצע החיזוי בתוכנת CAT, בכל מיקום גיאוגרפי נדרש. הפלט המתקבל כולל פוליגונים רדיאליים סביב כל נקודת חיזוי בהתאם לאוריינטציה שהוגדרה.

המודל הודגם בהצלחה עבור מטריצה של 7x7 תאים באזור העירוני של בת-ים בשטח הכולל גם את מתקן הביו-פילטר. על מנת לבחור אזור מייצג נעשה ניתוח hot-spot analysis של יחסי הגובה/רוחב של הבניינים על שטח העיר בת ים (כ-8.28 קמ"ר). ניתוח זה מאפשר לזהות אזורים בעלי התקבצות של ערכים גבוהים (המובילים לאי חום גבוה יותר) ואזורים בעלי התקבצות של ערכים נמוכים. בנוסף, הניתוח מתבסס על מבחנים סטטיסטיים המאפשרים להעריך אם הדפוסים שזוהו הם אמנם בעלי מובהקות סטטיסטית.

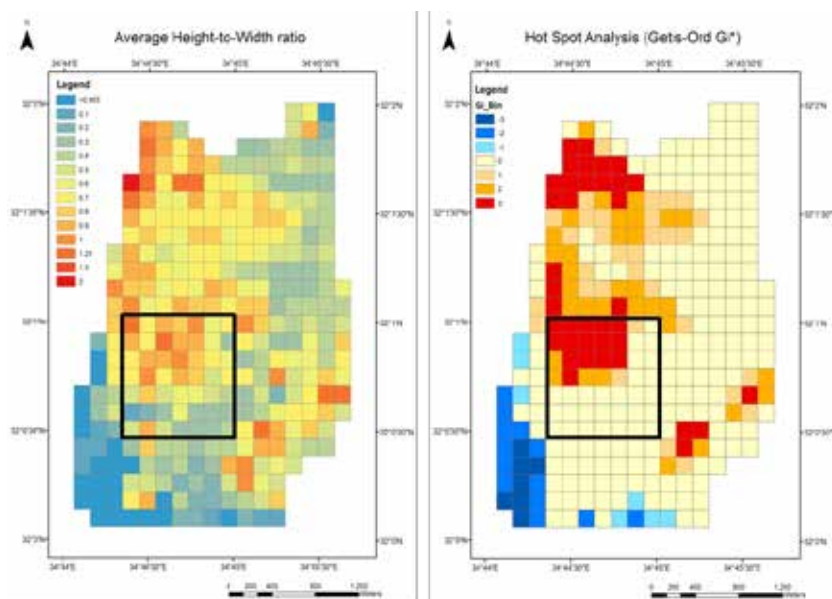
הניתוח הראה (איור 25) שיחסי הגובה/רוחב נעים בין 0 ל-1.96 (ממוצע - 0.5), כאשר הערכים הגבוהים מרוכזים בשני מקבצים עיקריים. ניתוח הדמאות Google Earth הראה שאזורים אלו מאופיינים בבנייני מגורים של 3-6

קומות בעלי צפיפות גבוהה, המסווגים כבעלי מורפולוגיה עירונית 'compact mid-rise' על פי מודל הסיווג לאזורי אקלים מקומיים של (Stewart and Oke, 2012).

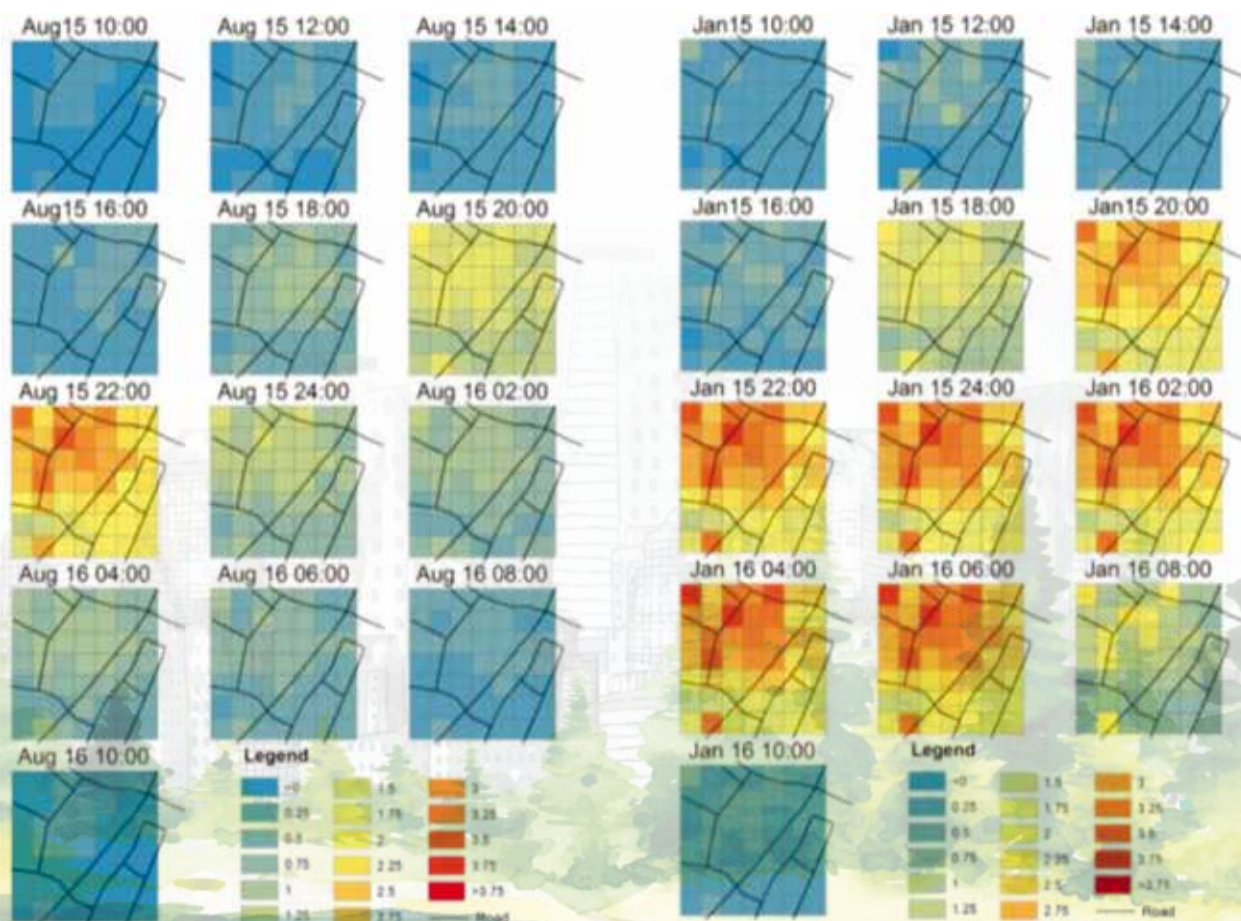


איור 24: נקודות המדגם המייצגות מטריצה של 7x7 תאים, כולל דוגמה (בתא הצפון-מזרחי ביותר) לאחד מתוך 49 המעגלים שהמודל מייצר סביב כל נקודת חיזוי

לצורך הצגת ההתפתחות המרחבית והעתית של אי החום העירוני נבחרו יום חורף ויום קיץ אופייני. כצפוי, הדפוס המרחבי של אי החום תואם את דפוס יחס הגובה/רוחב (איור 26). אי החום הממוצע הינו 2.5-2.25 עבור שני הימים שנבחרו. בחורף אי החום נמשך במהלך רוב שעות הלילה לעומת הקיץ בו אי החום מגיע לשיאו בשעה 22:00 ומתפוגג מיד לאחר מכן. הסיבה להבדל נעוצה במשטר הרוחות: בחורף מהירות הרוח היא "0" בשעות הלילה. נתון זה בשילוב הקרינה הנמוכה במהלך היום והעדר עננות מוביל לטמפרטורות נמוכות בתחנה המטאורולוגית. בקיץ, מהירות הרוח יורדת במהלך הערב אך מתגברת סביבות השעה 23:00 (בריזת לילה) וגורמת לערבול האוויר והסעת החום מהעיר (Kaplan et al., 2016).



איור 25: הדפוס המרחבי של יחס גובה/רוחב עבור בת-ים (שמאל) וניתוח hot-spot (ימין)



איור 26: ההתפתחות המרחבית והעיתית של אי החום העירוני עבור יום חורף (ימין) ויום קיץ (שמאל)

3.2.5 הדמיית טמפרטורת אוויר בעיר בשיטות שונות

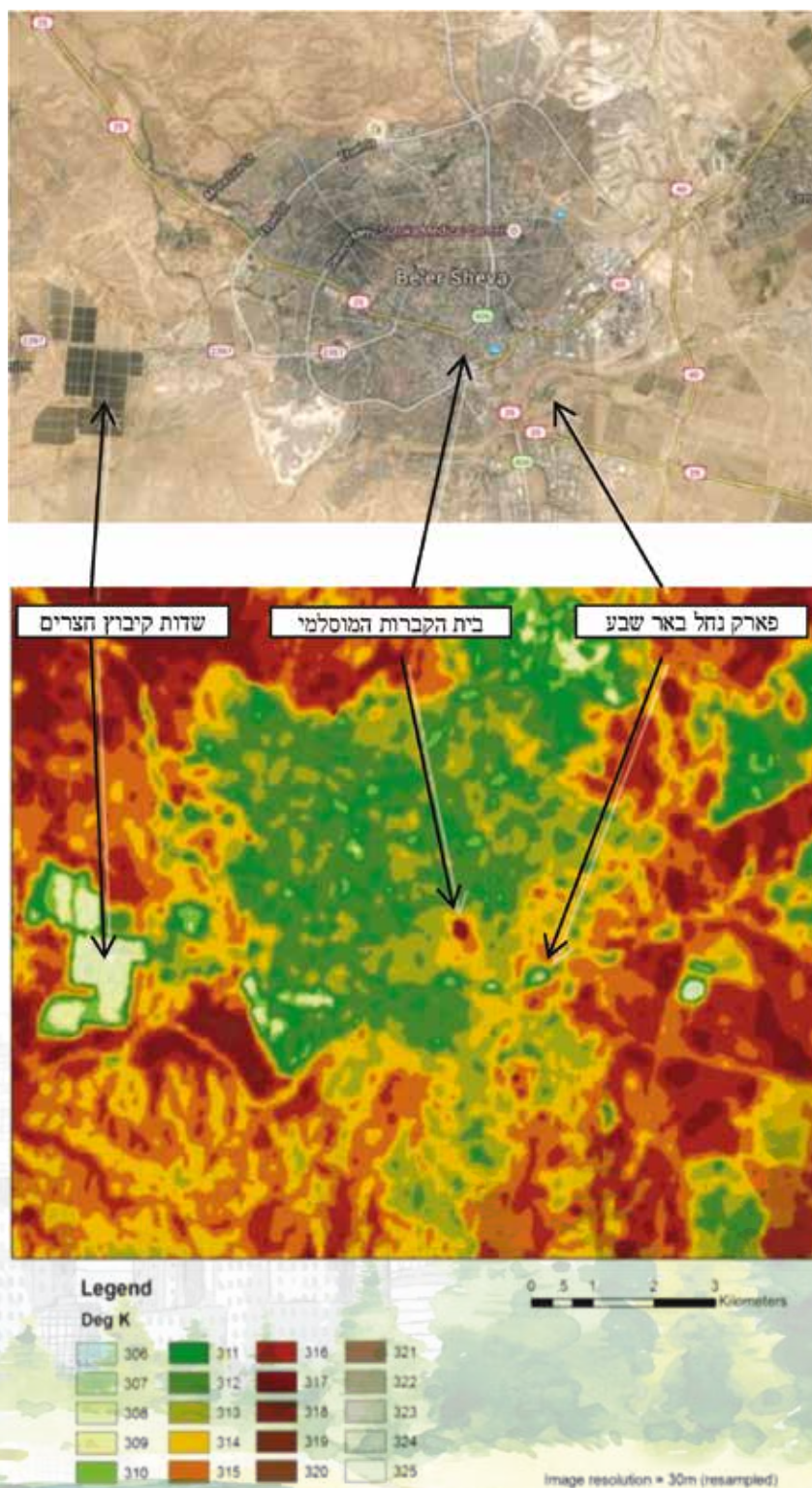
את ההשפעה של אמצעים שונים (כגון צמחייה) על טמפרטורת האוויר בעיר אפשר להעריך בצורות שונות. ביקשנו אפוא לערוך השוואה בין הנתונים המתקבלים מהדמאת לוויין, מהדמיות מחשב באמצעות CAT ומדידות נקודתיות בשטח. לכל אחת מהשיטות יתרונות וחסרונות, אותם ניתן לסכם בטבלה 5.

טבלה 5: השוואת שיטות שונות לאמידת הטמפרטורה בעיר

מדודות	לוויין	הדמיה CAT
שטח כיסוי	נקודות בודדות	העיר
רזולוציה מרחבית	נקודתית	נקודות המייצגות תאים של 150X150 מ'
רזולוציה עיתית	ערך אחד לכל נקודה במסלול המדידה	שעה קבועה, פעם בשבועיים
מזג אוויר	אין הגבלה	כל מזג אוויר
תכסית	נגישה לחוקרים (ברכב או אופניים)	משתחים החשופים לשמיים בלבד

הערה: הלוויין מתאר טמפרטורה של פני השטח. ההמרה לטמפרטורת אוויר מורכבת מאוד, דורשת כיוול על סמך מדידות קיימות רבות, ואינה אפשרית בקנה מרחבי קטן. ראו למשל: Rosenfeld et al, 2017.

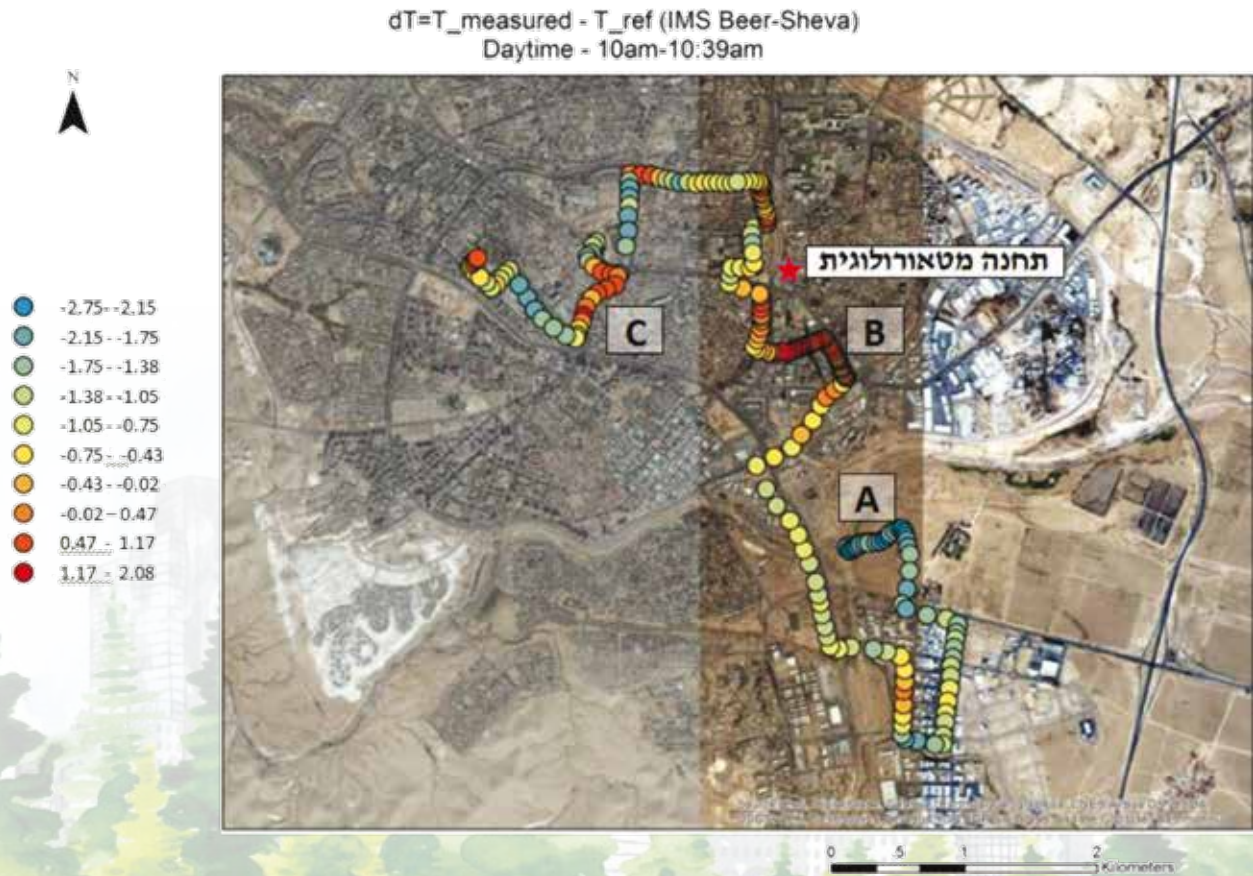
איור 27 מראה צילום תרמי של העיר באר שבע אשר נעשה בשעה 10:15 בבוקר ביום קיץ בהיר (יולי 2015).



איור 27: למטה: צילום תרמי של העיר באר שבע בשעה 10:15 בבוקר. טמפרטורת פני השטח מתוארת במעלות קלווין. למעלה: צילום אופטי של אותו אזור (Google Maps).

התמונה התרמית ממחישה את הקושי בקבלת טמפרטורת אוויר במרחב העירוני על בסיס נתוני הלווין. שטחים מושקים, כגון פארק ואדי באר שבע או שדות קיבוץ חצרים, אמנם נראים בכירור ככתמים בגוון ירוק בהיר (קרים), שהטמפרטורה שלהם היא כ-307-308 קלווין (בערך 34-35 מעלות צלזיוס). אולם הקרקע החשופה מחוץ לעיר חמה במידה ניכרת מהשטחים האלה, והעיר כולה נראית קרירה יותר מאשר המרחב סביבה. לא ניתן כמעט להבחין בהשפעתן של גינות מקומיות בעיר משום שהרזולוציה של הלווין גסה מדי, ושטח הגינות קטן משטח הפיקסלים הבודדים בתמונה. הכתם החם במרכז העיר, שהטמפרטורה שלו היא כ-315-316 קלווין (כ-42-43 מעלות צלזיוס) הוא בית הקברות המוסלמי – שטח פתוח וחשוף, נטול צמחייה.

מדידות טמפרטורה ניידות נעשו בזמן מעבר הלווין באמצעות מערך מדידה אשר נישא על גבי מכונית. הפרש הטמפרטורה בין הנתונים אשר נרשמו ברכב לבין טמפרטורה אשר נמדדה בו-זמנית בתחנה קבועה של השירות המטאורולוגי הישראלי מתואר באיור 28. לאורך רוב המסלול חושב הפרש טמפרטורה שלילי, כלומר הטמפרטורה ברחבי העיר הייתה מעט נמוכה מהטמפרטורה בתחנה המטאורולוגית. תופעה זו בולטת יותר בשולי העיר, בשטח פארק נחל באר שבע (נקודה A). הפרש טמפרטורה חיובי של 1-2 מעלות צלזיוס נרשם רק במרכז העסקים של העיר (B) וברחוב הראשי של שכונת מגורים ובה בניינים בגובה בינוני או גבוה (C).



איור 28: הפרשי טמפרטורה (מעלות צלזיוס) אשר נמדדו באמצעות רכב אשר חצה את העיר באר שבע בין השעות 10:00-10:30 ביום קיץ בהיר (12 יולי 2016). מיקום התחנה המטאורולוגית אשר שימשה כתחנת ייחוס מסומן בכוכב אדום

4. הנחיות והמלצות מעשיות לביצוע

מדי חורף, אנו חווים הצפות בישובים עירוניים שונים בכל רחבי הארץ. חלקם של האירועים מתרחשים במקומות מועדים, שנה אחר שנה, אבל חלק ממקרי ההצפה מתרחשים באזורים אשר אינם מוכרים כבעייתיים. זיהוי שיטתי של כל האזורים הנמצאים בסכנת הצפה עשוי לסייע בהפיכת הנגר העילי העירוני מנטל לנכס. את מי הנגר אפשר יהיה לנצל להחדרה למי התהום או להשקיה של צמחייה אשר תסייע בהפגת אי החום העירוני. לשם כך יש צורך לא רק לזהות את הנקודות שבהן ניתן לקצור את מי הנגר אלא גם את האזורים שבהם תוספת צמחייה תביא לתרומה הרבה ביותר לנוחות תרמית של הולכי רגל או לחיסכון באנרגיה בבניינים.

חשוב להדגיש כי עצמתו של אי החום העירוני קטנה בדרך כלל בשעות היום, כפי שהראו הדמיות המחשב והמדירות בבאר שבע. הפרש הטמפרטורות בין העיר לסביבתה מורגש בעיקר בלילה. יחד עם זאת, הצמחייה עשויה לשפר את הנוחות התרמית של הולכי רגל בקרבתה בשעות החמות. לשם כך, יש צורך בכלים אשר יסייעו למתכננים למקם צמחייה מתאימה ולהעריך את תרומתה.

עם השלמת המחקר, יהיו בידי המתכננים כלים תומכי החלטה אשר יסייעו לתכנון מושכל של תכנון עירוני רגיש למים על ביסוס ניתוח מלא של מאזני המים והאנרגיה ברחובות, בגינות ובשטחים הפתוחים בסביבה הבנויה. הכלים האלה אמנם ידרשו מומחיות רבה – בהכנת הנתונים להדמיות, בהרצת תוכנות המחשב ובניתוח התוצאות – אולם הם יהוו קפיצת מדרגה בהשוואה לאמצעים העומדים בידי המתכננים כיום. אנו צופים שני תהליכים עיקריים:

א. ניתוח הידרולוגי בשכונות עירוניות קיימות בתרחישים שונים המבטאים כמויות משקעים ועוצמות גשם שונות, על מנת לזהות מוקדים המועדים להצפה. בהתאם לתחזיות ניתן יהיה לבחון את השפעתן של חלופות תכנון שונות אשר מטרתן למזער את הנזקים ולאפשר ניצול מיטבי של מי הנגר. בעוד שכיום נמצאים בידי המתכננים אוגדנים גנריים, הניתוח הממוחשב יאפשר למפות אמצעים מתאימים הבאים לתת מענה לבעיות ממוקדות ולהעריך שיקולי עלות-תועלת על מנת להגיע לפתרון האופטימאלי.

ב. מיפוי של הטמפרטורות במרחב העירוני וזיהוי מוקדים של טמפרטורה גבוהה אשר עלולים להיות בעייתיים במיוחד בזמן גלי חום, עקב ההשפעה המשולבת של התנאים הסינופטיים והשפעת אי החום העירוני.

הכלים אשר מפותחים במסגרת המחקר הזה נבחנים בהקשר הישראלי, בתיאום עם קבוצות המחקר האחרות. תפוסת המשקעים בארץ וסוג התכסית מביאים לכך שריכוז המוצקים המרחפים במי הנגר בישראל הינו פי 6-4 בהשוואה, למשל, לאוסטרליה, למשל, לכן יש חשיבות במתן פיתרונות אשר יהיו ימנעו פגיעה בתכונות הקרקע ובצמחייה הקולטת את הנגר.

השימוש המשולב בכלים הממוחשבים יאפשר לנצל את האמצעים לטיפול במי הנגר, המשלבים צמחייה, לשיפור התנאים הסביבתיים ובפרט להקלת עומס החום. ההחלטות בדבר היישום של אמצעים שונים כגון אלמנטים נקודתיים, קווים או מרחביים ייעשה אפוא על מנת לתת מענה מיטבי לשתי הסוגיות.

מקורות

משרד הבינוי והשיכון – משהב"ש (2007), המלצות לתכנון ניקוז עירוני (עורך אינ' ירון שלומי, חברת הידרומודול – פולק שמואל בע"מ).

Erell E. and Williamson T. (2006). Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *International Journal of Climatology*, 26: 1671-1694.

Kaplan S., Peeters A. and Erell E. (2016). Predicting air temperature simultaneously for multiple locations in an urban environment: a bottom up approach. *Applied Geography*, 76:62-74.

Leaf S. and Erell E. (2017). "A model of the ground surface temperature for micrometeorological analysis". *Theoretical and Applied Climatology*, in press. <http://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2207-5>

Salvadore E., Bronders J., & Batelaan O. (2015). Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions, *Journal of Hydrology* 529: 62-81.

Shoemaker, L. (2009). SUSTAIN — A Framework for Placement of Best Management Practices in Urban Watersheds to Protect Water Quality. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-09/095.

Shoemaker L., Riverson Jr J., Khalid A., Zhen J. X. and Murphy R. (2011). Report on enhanced framework (SUSTAIN) and field applications for placement of BMPs in urban watersheds, Report. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-11/144.

Shoemaker L., Riverson Jr J., Khalid A., Zhen J. X., Murphy R. and Wood B. (2013), Stormwater Management for TMDLs in an Arid Climate: A Case Study Application of SUSTAIN in Albuquerque, New Mexico, Report. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-13/004.

Stewart I. and Oke T. (2012). Local climate zones for urban temperature studies, *Bulletin of the American Meteorological Society* 93(12): 1879—1900.

Sun, Y., Tong, S., Yang, Y. J. (2016). Modeling the cost-effectiveness of stormwater best management practices in an urban watershed in Las Vegas Valley, *Applied Geography* 76, 49-61.



צילום: ירון זינגר

שער 3

טכנולוגיות רגישות מים

פיתוח טכנולוגיות מים משולבות חדשניות היכולות להיות מיושמות בנוף העירוני על מנת לקדם מרקמים עירוניים רגשי מים





פרויקט 3.1: פיתוח ביו-פילטר היברידי לטיפול במי-נגר עירוני ולשיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות

1. מבוא

בישראל הוקדשו מאמצים רבים לפיתוח מקורות מים חלופיים עקב מצוקת המים, תקופות בצורת הארוכות, ושאיבת היתר מן האקוויפר והכנרת. בשנים האחרונות הוקמו מספר מתקני התפלה אשר הקלו על מצוקת המים, וכן יושמו מתקני טיפול והשבת שפכים בהיקף נרחב ומוביל ברמה עולמית. אולם עד כה לא ניתנה שימת לב לניהול מי-שיטפונות במגזר העירוני. אמנם כמות הגשמים בישראל אינה גבוהה, אך בשל פריסתה הדלה נגרמים מדי שנה נזקים ושיבושים רבים עקב הצפות וכן אובדות כמויות מים משמעותיות שאותן ניתן לנצל בשינוי גישת הניהול.

הניסיון באוסטרליה, ובכלל בעולם, מתמקד בביו-פילטר לטיפול במי-שיטפונות הכוללים ריכוזים נמוכים של חומר אורגני ותרכובות חנקן וזרחן. ביישום גישה זו בארץ ניתן להיעזר בניסיון הגלובלי, בעיקר בטיפול במי-שיטפונות בעונת החורף. אולם, יש לכייל את התכנון בהתאם לתנאי הזרימה ולאיכות האופיינית של מי-שיטפונות בישראל. קושי גדול יותר הוא התאמתו של הביו-פילטר לטיפול במשך מרבית השנה לשיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות, והסבתו בתקופת החורף לטיפול "קונבנציונלי" במי-שיטפונות. לצורך כך פותחה גישת היישום הייחודית של ביו-פילטר היברידי כפי שהוצגה לראשונה בכפר סבא (איור 29). פיילוט הביו-פילטר בכפר סבא הציג גישה רב שימושית – היברידית ורב שנתית. כלומר, בחורף הביו-פילטר מיועד לקצור מי נגר, להשהות אותם, לטהר אותם ולהחדירם למי התהום לשם העשרתם, כאשר בקיץ הביו-פילטר מטפל במי התהום המקומיים שבדומה לכל אזור השרון עשירים מאוד בחנקות < 130 מג"ל של ניטראט, כתוצאה מדישון יתר לאור זאת שהשטח העירוני היה בעבר שטח חקלאי מניב. בעקבות זאת בארות רבות הושבתו לאספקת מי שתיה. הביו-פילטר במתכונתו הקיצית הצליח להרחיק 73% של ניטראט ממי התהום בריכוז של 35 מג"ל, דבר שהכניס את תוצאות איכות המים ביציאה מהביו-פילטר לטווח של מחצית ריכוז מותר למי שתיה (70 מג"ל). אולם, משבחנו את הביו-פילטר לזרימה רציפה של ניטראט, נצפה דרדור לערך הרחקה של 25% בלבד.

לכן, מטרת המחקר בפרויקט זה הינה להביא את מערכת הביו-פילטר לאופטימיזציה עבור שתי האפליקציות ובעיקר טיהור מי תהום על בסיס משטר זרימה רציף 24/7, דבר שיאפשר מופע מים לאורך כל השנה, שיקום מאסיבי של מי תהום, העדר צורך בהשקיה לאור התפעול הרציף ויצירת מיקרו-אקלים עירוני על-מנת להנחית את החתימה התרמית בערים.

1 קליטת המים

השלב הראשון בתהליך טיהור המים של מערכת הביובילטר מזוהמים והובלתם אל מערכת הביובילטר.

תהליכים מרכזיים:

- קליטת מים מזוהמים באחת מ-3 דרכים: קליטה מתוך צנורות הניקוז העירוניים של מי הגשמים, קליטה ישירה של מי גשמים כשהם נאספים מעל הקרקע (ישירות מהכביש בדרך כלל) וקליטת מי תהום מזוהמים שנשאבים מתוך בארות.
- הובלת המים אל פני השטח של הביובילטר שם ממוקמות שכבות טיהור שמסננות ומטהרות את המים.

2 טיהור המים

השלב השני בתהליך טיהור המים הוא סינון וטיהור המים המזוהמים.

תהליכים מרכזיים:

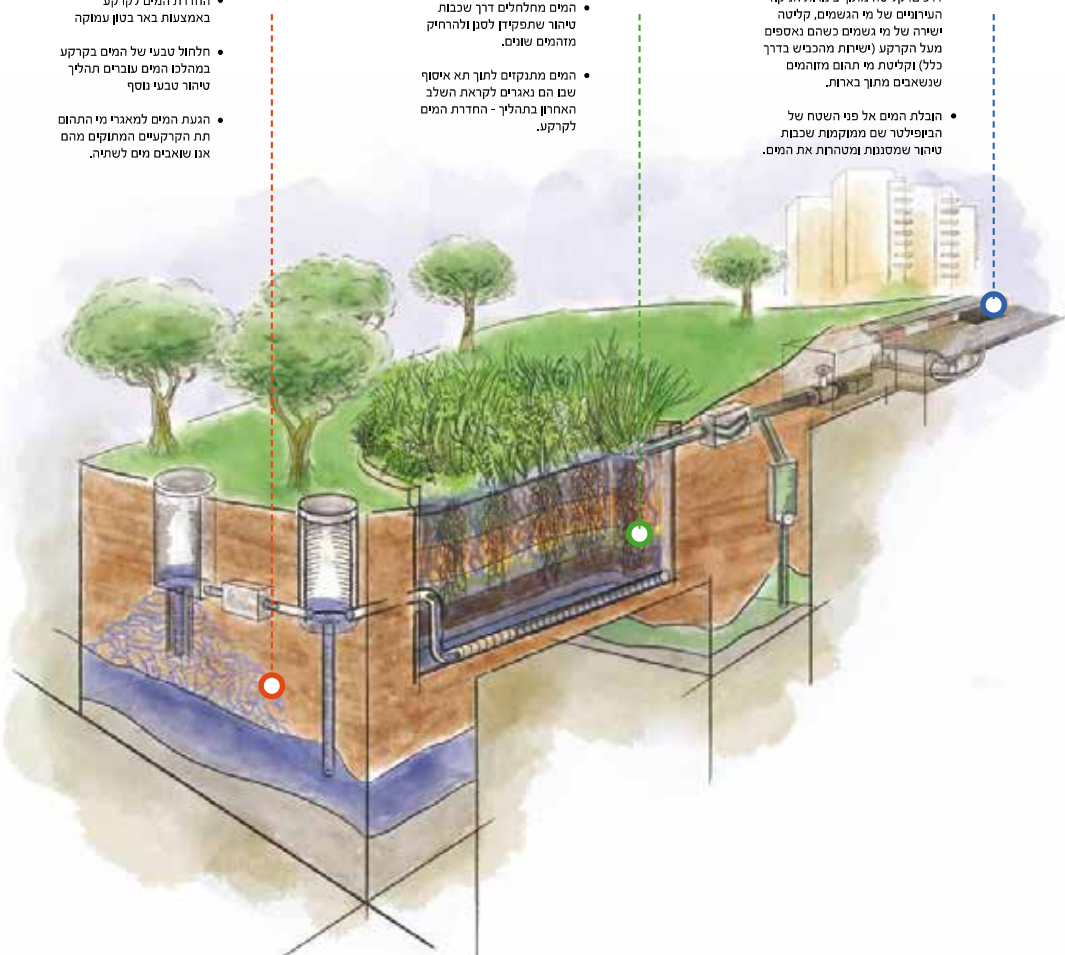
- המים המזוהמים מוזרמים לתוך פני השטח של מערכת הביובילטר המכוסה בצמחים יחודיים.
- המים מחלחלים דרך שכבות טיהור שתפקידן לסנן ולהרחיק מזוהמים שונים.
- המים מתנקטים לתוך תא איסוף שם הם נאגרים לקראת השלב האחרון בתהליך - החדרת המים לקרקע.

3 החדרת המים

השלב השלישי בתהליך טיהור המים הוא החדרת המים שטוהרו על ידי המערכת אל הקרקע. המים מחלחלים אל הקרקע עד להגעתם למאגרי מי התהום.

תהליכים מרכזיים:

- החדרת המים לקרקע באמצעות באר בטון עמוקה.
- חלחול טבעי של המים בקרקע במהלכו המים עוברים תהליך טיהור טבעי נוסף.
- הגעת המים למאגרי מי התהום תת הקרקעיים המתוקנים מהם אנו שאובים מים לשתייה.



איור 29: גישת הפיתוח והיישום של ביו-פילטר היברידי בישראל

החלק של אוניברסיטת בן-גוריון מתמקד בפיתוח מערכות כאלה לטיפול במי-שיטפונות בעונת החורף ולשיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות בתקופת הקיץ. זו גישה ייחודית לישראל ממפני שהאקלים בארץ מאופיין בתקופת יובש ארוכה (כשמונה חודשים). לכן, אי אפשר ליישם בפשטות את הגישה שפותחה במדינות אחרות (כאוסטרליה) אשר בהן פרוס המשקעים הוא על פני כל השנה. זאת אומרת שמבנה הביו-פילטר ואופן תפעולו שונים בשתי תקופות אלו מחייבים מחקר ופיתוח יסודי.

2. מטרת המחקר

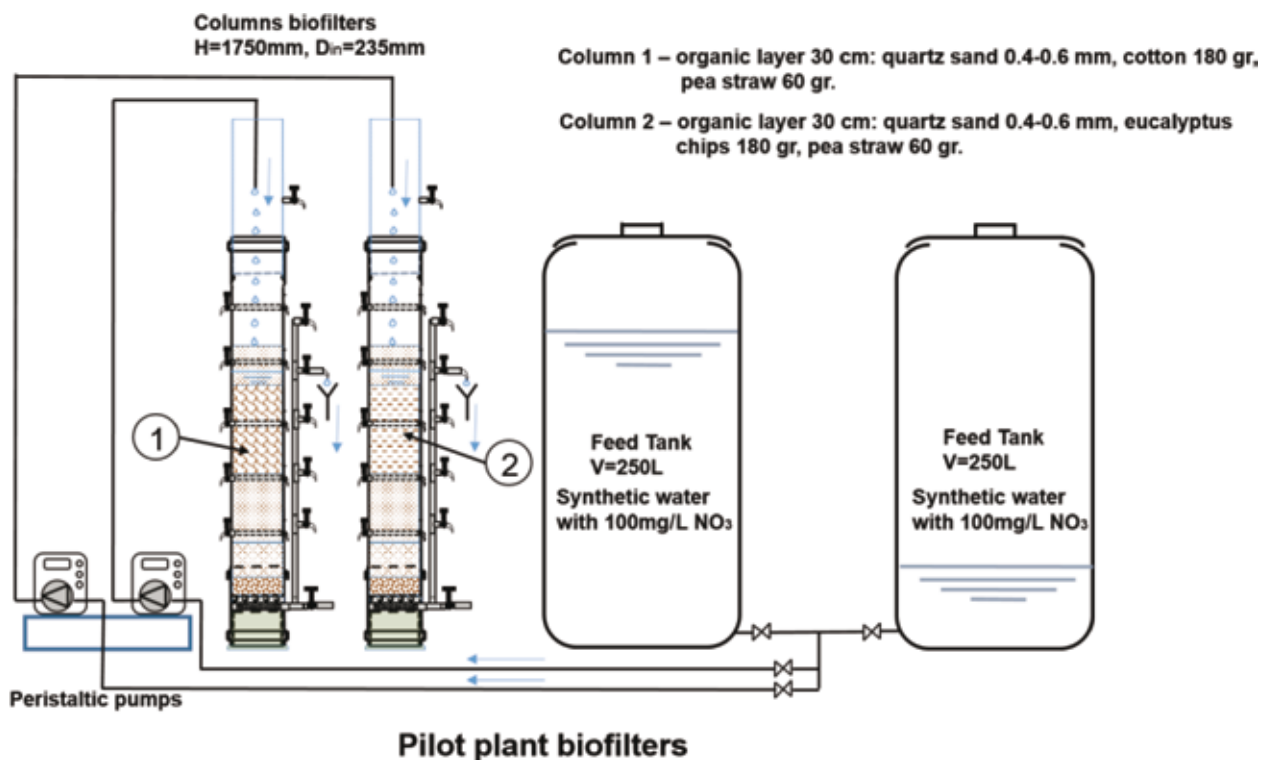
מטרת המחקר באופן כללי היא לקבוע כללי תכנון ותפעול של ביו-פילטר היברידי להשגת איכות מים נדרשת, לאורך כל השנה (שתי תקופות שונות מבחינת איכות המים המטופלים, דהיינו, טיפול במי-שיטפונות בתקופת החורף, ושיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות בתקופת הקיץ – כפי שמגולם באיור 29), תוך שימור הביומסה (צמחיה וחיידקים) ובזרימה רציפה. באופן פרטני, השאיפה היא להגדיר משתנים תכנוניים כגון: תצורת מצע הסינון, סוג התוסף האורגני, עומס הידראולי, צורת תפעול, סוג הצמחיה המועדף, וכן משתני תפעול כגון: אקלום המצע, צורת הזנה, והנחיות תחזוקה.

3. שיטות העבודה

3.1 – הרצת מודל משופר של ביופילטרים לדניטרפיקציה (תצורת קיץ)

לצורך המחקר תוכננו ונבנו מספר קולונות על פי ההמלצות האוסטרליות כפי שמתואר באיור 30. כל קולונה עשויה PVC, גובהה 121 ס"מ וקוטרה 23.5 ס"מ. לאורך הקולונה ישנן 5 נקודות דיגום הנמצאות באזורים שונים של הקולונה. בסיסי הקולונות מולאו בסומסום בזלת (5 מ"מ) על מנת לתת תמיכה מכאנית למצע הקולונות. מעליו מולאו הקולונות בחול קוורץ מדורג בשלוש שכבות: תווך גדול למטה (2.5-3.5 מ"מ), תווך ביניים (0.8-1.5 מ"מ), ושכבה עליונה (0.6-0.8 מ"מ). לכל קולונה צינור יציאת מים חיצוני מתחתית הקולונה העולה כלפי מעלה ומאפשר שליטה בדרגות רוויה שונות של המצע (ליצירת אזור אנוקסי לתהליך הדניטרפיקציה). בראש הקולונה מחובר חלק מפרספקס שקוף בגובה 54 ס"מ לתמיכה בצמחיה (סה"כ גובה המבנה 175 ס"מ). החלק העליון של שכבת החול הקטן ביותר, בגובה 30 ס"מ שימש כ"שכבה העוברת" לקיום דניטרפיקציה. עד לראשו נשמרה רוויה ועורכבו בו שני מקורות הפחמן: כותנה ושכבי עץ.

מעל האזור הרווי היה האזור הלא רווי. אזור זה בגובה 30 ס"מ הכיל רק חול קוורצי. אזור זה נועד לצרוך את החמצן המומס במים כך שריכוזו יהיה נמוך עם הכניסה לאזור הרווי. צינור היציאה יצא כאמור מבסיס הקולונה והורם לגובה מטר. באופן זה נשמר האזור הרווי במים. ההזנה התבצעה בטפטוף מלמעלה. צינור ההזנה חובר אל שני מיכלים אשר מולאו במי ברז בנפח של 250 ליטר בכל מיכל. לכל מיכל הוספו 40.72 גרם KNO_3 כך שריכוז הניטרט במיכלים היה 100 מג"ל. ההזנה התבצעה באמצעות משאבות *Masterflex L/S compact drive*. הספיקה ווסתה לשני ערכי עומס הידראולי שנוסו עד כה, 18 ו-36 מ"מ לשעה. תמונה של מערכת הניסוי ניתנת באיור 31.



איור 30: תמונת מערכת הפילוט עם שתי קולונות דניטריפיקציה במצעי כותנה/קש ושבי עץ/קש



(a)



(b)

איור 31: תמונת מערכת הפילוט עם שתי קולונות דניטריפיקציה ללא צמחים (a) ועם צמחי ווטיבר (b) צילום: צוות המחקר

3.2 – הרצת מודל משופר של ביופילטרים לטיפול במי-שיטפונות (תצורת חורף)

לצורך המחקר הוקמו והופעלו קולונות נוספות במטרה לדמות את השלב של טיפול במי-שיטפונות (עונת החורף). מבנה הקולונות וסוג מצעי החול זהה לתכנון של קולונות הדניטריפיקציה (ראה סעיף 4.1). אולם האזור הרווי בניסויי סינון מי-השיטפונות קטן יותר, כדי ליישם אזור אירובי גדול יותר לתהליכים של פירוק חומר אורגני וניטריפיקציה. על פי ניסיון קודם באוסטרליה ובכפר סבא, יש חשיבות להשארת אזור רווי בתחתית הקולונה. אזור זה גורם להארכת זמן השהייה בקולונה, מאפשר יישום תהליך אנוקסי של דניטריפיקציה (לחיזור ניטריטים הנוצרים בניטריפיקציה באזור האירובי), וכן מהווה מקור רטיבות לשורשי הצמחייה בהפוגות הארוכות של הזנת מי-שיטפונות.

הדמיית הטיפול במי-שיטפונות נעשה באמצעות הזנה של תמיסה סינתטית שמדמה הרכב אופייני של מי-שיטפונות באזור העירוני בישראל, על פי תדירות אופיינית של משקעים. לצורך תכנון שני פרמטרים אלו (הרכב המים ותדירות השיטפונות), נעשה שימוש בנתונים שנאספו על ידי שתי קבוצות המחקר האחרות (הטכניון והאוניברסיטה העברית) אשר עשו דיגום וכיול באזור כפר-סבא. באזור מזרח כפר סבא הם דגמו את מוצא האגן הכולל מגוון של כ-25 תתי אגנים שונים, אשר מתוכם שלושה תתי אגנים עם שימושי קרקע שונים: מגורים, תעשייה זעירה וכביש. לאחר ניתוח תוצאות עונת הגשמים הקודמת ללא הגשם הראשון ועונת הגשמים הנוכחית יחד עם הגשם הראשון, הם אפיינו את הרכב מי הנגר, תדירותם ועוצמתם.

על בסיס אפיון זה תוכננה תמיסת ההזנה שהורכבה ממספר מלחים על מנת ליצור את הריכוזים האופייניים של חנקן (5 מג"ל אמוניום כ-N), זרחן (2 מג"ל פוספאט כ-P), אשלגן (5 מג"ל כ-K), נתרן (20 מג"ל כ-Na), כלוריד (20 מג"ל כ-Cl), חומר אורגני (5 מג"ל מלח חומצה אצטית כ-TOC), אלקליניות (30 מג"ל כ-CaCO₃), ו-pH (7). תמיסת ההזנה הורכבה מ-80% מים מזוקקים ו-20% מי-ברז. כדי לווסת את ההגבה נעשה שימוש בנתרן בי-פחמתי אשר מוסיף אלקליניות ונתרן ברמה דומה למה שהתקבל באפיון בכפר-סבא.

בשלב הראשון נבחרו לניסוי שלושה סוגי צמחים על פי ניסיון קודם וזמינות/תפוצה בישראל: טולבגיה, אגפנגוס, ווטיבר (ראה איור 32).



איור 32: סוגי הצמחים שנבדקים לטיפול במי-שיטפונות (משמאל: אגפנגוס, טולבגיה, ושני צמחי ווטיבר) צילום: צוות המחקר

4. תוצאות

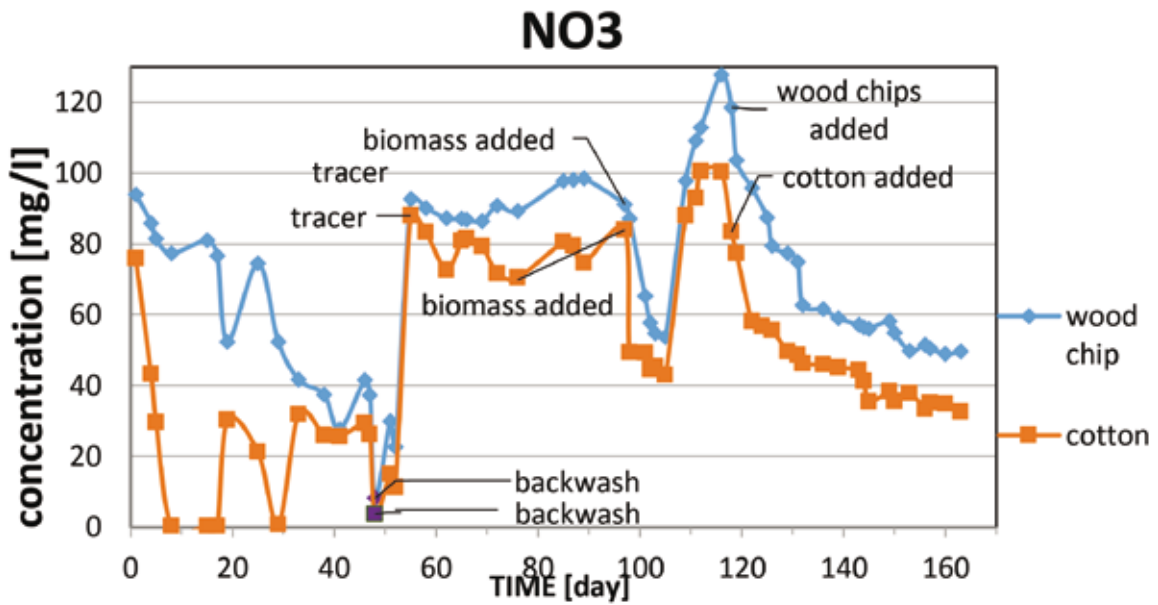
4.1 – הרצה של הביופילטרים המשופרים לסימולציה של שיקום מי-תהום מזוהמים בחנקות (תצורת קיץ)

על פי המתואר בסעיף 3.1, הורצו שתי קולונות כביופילטרים לקיום דניטריפיקציה לטיפול רציף בתמיסה סינטטית המדמה מי-תהום מזוהמים בחנקות. נבדקה האפקטיביות של שני מקורות פחמן: כותנה לעומת שבבי עץ אקליפטוס. בשימוש בכותנה, החומר האורגני המנוצל לדניטריפיקציה מגיע מהידרוליזה הכותנה לסוכרים. השימוש בשבבי עץ אקליפטוס וכן תכנון והקמת הקולונות, מבוססים על הניסיון האוסטרלי מבחינת המבנה הפנימי של הקולונות והסידור המדורג של שכבות החול.

4.1.1 – הרחקת ניטרט

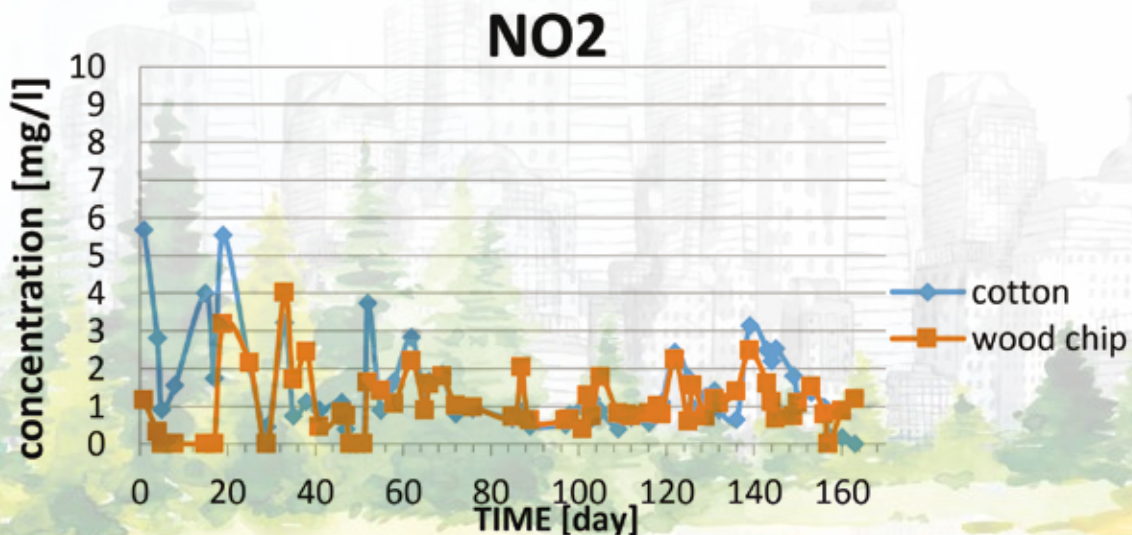
תיאור מפורט של השתנות ריכוזי הניטרט לאורך תקופת הניסוי שבה בוצעו מספר שינויים תפעוליים, ניתן באיור 3.3. התוצאות שהתקבלו היו משביעות רצון מבחינת הרחקת הניטרט והחומר האורגני בקולחי המערכת. בהשוואת זמן ההתאקלמות בין שתי הקולונות ניתן לראות כי קולונת הכותנה התאקלמה כבר בשבוע הראשון לתחילת הניסוי. לעומת זאת, לקולונת שבבי האקליפטוס נדרש זמן התאקלמות ארוך יותר והרחקת הניטרט הייתה מתונה יותר ביחס לקולונת הכותנה. עם הזמן ניתן לאבחן ירידה הדרגתית בריכוזי הניטרט ביציאה מהקולונה עד לערכים של כ-20 מג"ל (יעילות הרחקה 80%). אולם אובחנה גם עלייה בהפסד העומד שהתבטאה בהצטברות של נוזל מעל פני המצע. תופעה זו הצריכה שטיפה נגדית כדי לשחרר את בועות החנקן (ביום ה-48).

עקב הפעלת השטיפה הנגדית במהירות גבוהה מדי שגרמה לשטיפת הביומסה והחומר האורגני מן הקולונות, נגרמה עלייה בריכוז הניטרט ביציאה מהקולונות לסביבות 90 מג"ל. גם ביצוע מבחן נותב תוך שימוש בברומיד בהעמסה חד פעמית גבוהה יחסית תרם להידרדרות בתפקוד הקולונות. לכן, על מנת לאושש את פעולת הקולונות נעשתה תוספת ביומסה בצורה הדרגתית (ראו באיור 3.3 יום 98). כמו כן ביום ה-118 של ההפעלה הוספו 30 גרם מכל מקור (ללא קש אפונה) לשתי הקולונות בתוספת מנה נוספת של ביומסה מאוקלמת.



איור 33: ערכי ניטרט ביציאה מקולונות הכותנה ושבבי העץ לאורך הזמן

פעולה זו השיבה את פעילות הקולונות והרחקת הניטרט חודשה בשנית. באיור 33 ניתן לראות ירידה בריכוז הניטרט עד התייצבות הקולונות על ערכי ניטרט של $\sim 35 \text{ mg/L}$ בקולונת הכותנה וכ- 50 mg/L בקולונת שבבי העץ. בסיכומו של שלב הפעלה ארוך זה של כשישה חודשים בהזנה רציפה, ניתן להסיק כי לקולונת הכותנה יעילות טובה יותר מאשר לקולונת שבבי העץ. לאחר התייצבות המערכת הוחלט להגדיל את ספיקת המשאבות פי 2, ולבדוק את יעילות הרחקת הניטרט במצב זה. נתוני עומס הידראולי זה ($36 \text{ מ}^3 \text{ לשעה}$) מראים עד כה תוצאות דומות.



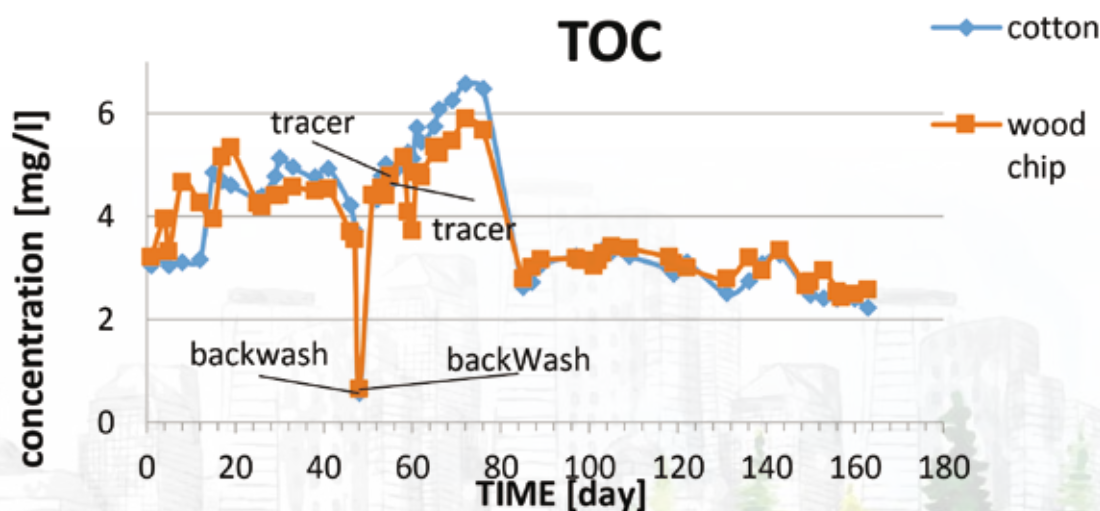
איור 34: ערכי ניטריט ביציאה מקולונות הכותנה ושבבי העץ לאורך הזמן

4.1.2 – יצירת ניטריט

התמיסה הסינתטית שהוכנה להזנת שתי הקולונות לא כללה ריכוזי ניטריט. ניטריט מהווה תרכובת ביניים בתהליך הדניטריפיקציה. ניטריט הוא חומר מסוכן יותר מניטרט (סף ההשפעה על כחלת הרבה יותר נמוך) ולכן חשוב מאוד שלא יצטבר במערכת בשלב הדניטריפיקציה. משלבי המחקר בשנה הראשונה הסקנו כי הצטברות ניטריט במערכת קשורה ביחס שבין ריכוז החומר האורגני לריכוז החנקן וכן לעומס ההידראולי במערכת. לכן בשלב זה של הניסויים הקטנו את העומס ההידראולי ביחס לשנה הראשונה במטרה להגיע לדניטריפיקציה טובה אך לא להרחקה מוחלטת של הניטרט. במצב זה התקבלו ריכוזי ניטריט נמוכים ביציאה מהקולונה (איור 34).

4.1.3 – גורל החומר האורגני

מאיור 35 ניתן ללמוד כי עבור שתי הקולונות כמעט שלא נצפתה הצטברות של TOC (ריכוז חומר אורגני). בתמיסת ההזנה הסינתטית כמובן שלא הוכנס חומר אורגני. לאחר השטיפה הנגדית ניתן לראות כי ריכוז החומר האורגני במערכת ירד משמעותית וזאת בעקבות יציאה של כותנה ושכבי עץ מהקולונות. לאחר ההוספה הראשונה של ביומסה שוב עלו ערכי ה-TOC במערכת, אך לאחר ניסוי הנוטב (ניסוי שבו מזריקים חומר שניתן לעקוב אחר תנועתו בתוך הקולונה) שוב הייתה ירידה בערכים.

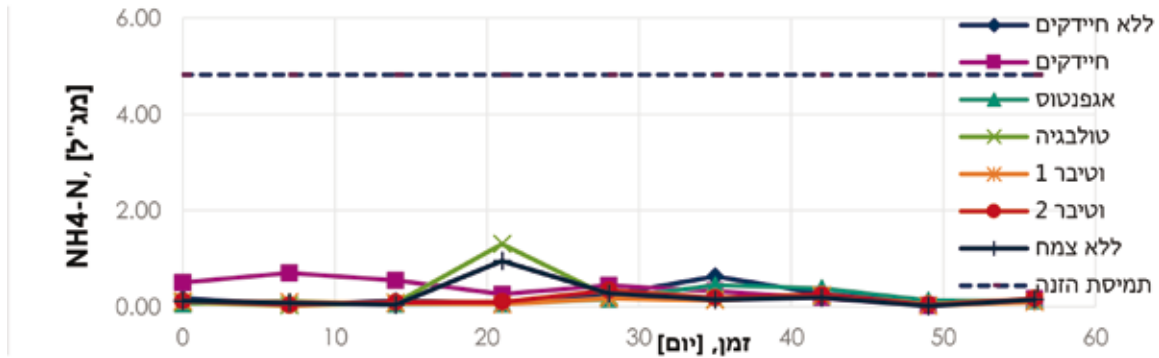


איור 35: ערכי TOC ביציאה מקולונות הכותנה ושכבי העץ לאורך הזמן

זמן קצר לאחר ניסוי הנוטב (יום 75) ריכוז החומר האורגני במערכת שוב ירד בפתאומיות אך עדיין ריכוזו היה כזה שאפשר לקולונות לפעול ביעילות. ניתן לראות כי לאחר אותה ירידה בערכי ה-TOC, נשמר ריכוז החומר האורגני קבוע עד לסיום תקופת הניסוי ועמד על כ- 3mg/L.

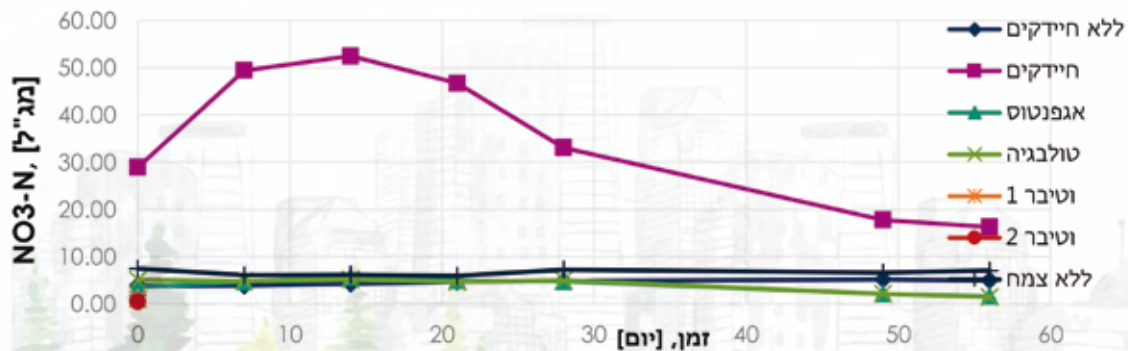
4.2 – הרצה של ביופילטרים להדמיית טיפול במי-שיטפונות (תצורת חורף)

על פי המתכונת המתוארת בסעיף 3.2, הורצו שבע קולונות במקביל על פי הפירוט הבא: 1. מודל אוסטרלי ללא צמחיה וחיידקים, 2. מודל אוסטרלי ללא צמחיה ועם חיידקים ממט"ש לצורך אקלימציה, 3. עם צמח אגפנטוס, 4. עם צמח טולבגיה, 5. עם צמח וטיבר, 6. קולונה נוספת עם צמח וטיבר, 7. ללא צמחיה (ביקורת).



איור 36: ערכי אמוניה ביציאה מהקולונות בתפעול להדמיית טיפול במי-שיטפונות

הקולונות מופעלות כבר מספר חודשים לאחר אקלימציה עם הזנה יומית של 1 ליטר במנה אחת. בשלב שני נעשה מעבר לשתי מנות שבועיות של שני ליטר לכל קולונה, ובהמשך ייבחנו נתוני שיטפונות אופייניים לישראל. תוצאות הרחקת האמוניה, והניטרט ניתנות באיורים 36 ו-37.



איור 37: ערכי ניטרט ביציאה מהקולונות בתפעול להדמיית טיפול במי-שיטפונות

5. מסקנות

- א. כותנה גולמית הוכחה כמקור פחמן יעיל לתמיכה בתהליך הדניטריפיקציה מפני שהיא גורמת לשחרור השארית הקטנה ביותר של חומר אורגני לתמיסה, וייצור הניטריט הוא מינימלי.
- ב. בהרצה ארוכת טווח של שתי קולונות במתכונת תכנון שכבות המצע על פי הגישה האוסטרלית, עם שני תוספים של מקור חומר אורגני מוצק (כותנה לעומת שבבי עץ) הופגנה יעילות טובה של דניטריפיקציה. זה מצביע על פוטנציאל יישום גישה זו לשיקום מי תהום מזוהמים בניטריטים.
- ג. העומס ההידראולי הוא פרמטר תפעולי קריטי המשפיע על יעילות הריאקציות הביולוגיות ועל גלישת תוצרים בלתי רצויים לקולחים.
- ד. לא כדאי להרחיק לחלוטין את הניטרט מפני שעלולים להיווצר תנאים אנארוביים שיגרמו לחיזור סולפאטים (המצויים במי-תהום) לסולפידים.
- ה. בהרצה ראשונית של קולונות לטיפול בהרכב אופייני של מי-שיטפונות בעומס שבועי מתון וקבוע התקבלו תוצאות הרחקה טובות של תרכובות חנקן.
- ו. בטיפול בתמיסת מי-שיטפונות לא אובחנו עד כה הבדלים בין קולונות עם וללא צמחים.
- ז. תוספת חיידקים ממט"ש עירוני לצורך החשת אקלימציה לא תרמה באופן משמעותי לתפקוד המערכת.



שער 4

ערוצי יישום

יישום חידושים חברתיים-טכניים

אשר יוביל לפיתוח ערים רגישות מים בישראל





פרויקט 4.1 ניהול מקיים (בר-קיימא) של נגר במסגרת תכנון ערים בישראל, חקר מדיניות ופרקטיקות מיטביות

מבוא

פרויקט מחקר זה הינו חלק ממאמץ נמשך במדינות רבות, וישראל בתוכן, לשלב בין תכנון עירוני ואזורי – תכנון של הסביבה הבנוייה ושל השטחים הפתוחים – לבין ניהולם של משאבי המים. המטרה היא לאפשר פיתוח בר-קיימא של העיר ושימוש בר-קיימא במשאבי המים, לטובת האדם והטבע. גישת תר"מ – תכנון רגיש למים – המבטאת את המאמץ הזה, פותחה בטכניון על-ידי כרמון ושמיר החל משנות ה-90 למאה הקודמת.² תר"מ הינו גישה כוללת ואינטגרטיבית, המדגישה את שיתוף הפעולה החיוני בין מתכננים ואדריכלי נוף לבין מהנדסי מים וניקוז החל מן השלבים הראשונים של כול פרויקט, כדי לקדם באופן סימולטני וסינרגטי את המטרות הספציפיות של הפרויקט (להקים בית מגורים, לסלול כביש, לפתח פארק) יחד עם מכלול מטרות כלכליות, סביבתיות וחברתיות. במסגרת פיתוח תר"מ, הושם דגש מיוחד על ניהול מושכל של הנגר העל קרקעי, אלה המים הזורמים על הקרקע עקב ירידת גשמים (runoff, stormwater). תר"מ הפיץ בישראל את התפיסה שהנגר הוא משאב, שניתן לנצלו לטובת האדם והטבע, ולא רק מטרד, שיש לסלקו במהירות מן האזור המיושב. זו התפיסה שבהדרגה מתקבלת בישראל ובמדינות רבות בעולם, בצפון אמריקה, באירופה ובאוקיאניה.³

-
- 2 כרמון, נ. ושמיר, א. (1997) *תכנון עירוני רגיש למים: הגנה על אקוויפר החוף הישראלי*, חיפה: המרכז לחקר עיר ואזור, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל. שמיר, א. וכרמון, נ. (2007) *תר"מ – תכנון רגיש למים שילוב שיקולי מים בתכנון עירוני ואזורי*, חיפה: מכון גרנד למחקר המים הטכניון מכון טכנולוגי לישראל המרכז לחקר העיר והאזור.
- 9 Carmon, N., Shamir, U., (2010). "Water-sensitive planning: integrating water considerations into urban and regional planning". *Water and Environment Journal* 24, 181-191
- 3 Schuch, G., Serrao-Neumann, S., Morgan, E., & Choy, D. L. (2017). "Water in the city: Green open spaces, land use planning and flood management—An Australian case study". *Land Use Policy*, 63, 539-550. van Roon, M., Dixon, J. and van Roon, H. (2005) "Reformulating Planning Tools to Promote Low Impact Urban Design and Development". *Proceedings of the New Zealand Water and Waste Association 4th South Pacific Conference on Stormwater and Aquatic Resource Protection*, Auckland, New Zealand. Mitchell, V.G. (2004) "Integrated Urban Water Management: A Review of Current Australian Practice". CMIT-2004-075. *The Australian Water Association and CSIRO*, CSIRO, Victoria, Australia. Taylor, A.C. and Wong, T.H.F. (2002) *Non-structural stormwater quality best management practices. Technical Reports 02/11-02/14*, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Melbourne, Australia. Butler, D. and Davies, J.W. (2000) *Urban Drainage*. EandFN Spon, London. France, R.L. (2002) *Handbook of Water Sensitive Planning and Design*. Lewis Publishers, LLC/CRC Press Company, USA, 728 pp



פארק הרצליה. תכנון: שלמה אהרונוסון אדריכלות נוף. צילום: כרמל מרחב

פרויקט המחקר המוצג בזאת נערך במסגרת התיאורטית של מחקרי תר"מ ובמסגרת הארגונית-מקצועית של המרכז לערים רגישות מים. הוא עוסק בחקר קליטתה בישראל של המדיניות החדשה לניהול נגר, ניהול מקיים (בר-קיימא) של נגר בכלל, ונגר עירוני בפרט, ובפרקטיקות שמיישמות אותה תוך שילוב עם פרויקטים נופיים. ניהול מקיים של נגר משמעו ניהול שמתייחס לנגר כמשאב, שהמתכנן והמהנדס שואפים למקסם את התועלות המגוונות הטמונות בו ולקיים סינרגיה ביניהן. בהתאם לכך, ניהול מקיים של נגר יענה על המטרות הבאות:

מטרות חברתיות

שילוב חווית הטבע בעיר
תוספת איכויות לנוף העירוני
הגדלת מעורבות קהילתית
הטמעת ערכים חינוכיים

מטרות כלכליות

חסכון כספי מניצול ישיר של מי הנגר
חסכון כספי מצמצום הוצאות על תשתיות תיעול
יצירת הזדמנויות כלכליות

מטרות כחולות

העשרת אקוויפר
קציר מי נגר
הקטנת אירועי הצפות בעיר

מטרות ירוקות

העשרת המערכת האקולוגית המקומית
שיקום בתי גידול לחים ויבשים
שיפור איכות המים המקבלים (אקוות, נחלים, אגמים)

4. מטרות המחקר ושיטותיו

קבוצת המחקר כוללת מתכננים מתחומים מגוונים - אדריכלות נוף, מדיניות סביבתית, תכנון ערים ואזורים - מטרות פעילותה של הקבוצה הן:

1. חקר מדיניות ניהול של נגר בישראל

1.1 לזהות את השינויים שחלו בישראל בעשורים האחרונים ואשר איפשרו התקדמות לקראת יישום פרדיגמה מקצועית חדשה לניהול נגר עירוני (מנגר כמטרד לנגר כמשאב);

1.2 להסיק מסקנות ולהמליץ המלצות בדבר השינויים הנוספים הדרושים עבור יישום מלא יותר ורחב יותר של הפרדיגמה החדשה, ניהול מקיים של נגר בישראל.

2. הערכת היישום של פרקטיקות לניהול נגר בישראל

1.1 לזהות פרקטיקות נהוגות ולהעריך את תרומתן להשגת מטרות כחולות, ירוקות, חברתיות וכלכליות, כל אחת לחוד והסינרגיה ביניהן;

1.2 להציע מגוון של פרקטיקות ראויות (BMPs) Best Management Practices עבור פרויקטים בקני מידה שונים.

עבור כל אחת מן המטרות הותאמו שיטות לאיסוף וניתוח נתונים, כלהלן:

1. עבור חקר מדיניות ניהול של נגר בישראל

(א) סקירת ספרות בינלאומית וישראלית, שעניינה במדיניות פיתוח ותשתיות הנמצאת במעבר מתשתיות אפורות לתשתיות ירוקות, בעיקר חקר הגורמים שאינם טכניים המאפשרים את המעבר הזה;

(ב) איסוף וניתוח (תימטי) של מסמכי מדיניות, תכניות ארציות ומקומיות ומדריכי תכנון;

(ג) קיום סדנה בטכניון, שהוזמנו אליה פרופסיונלים שעוסקים בניהול נגר, בדרך כלל נגר עירוני, ברשויות המקומיות, ברשויות ניקוז ובמשרדים פרטיים; חלקה הראשון והשלישי הוקדשו להעברת ידע שנאסף בדבר ניהול מקיים של נגר, בעוד שבחלקה האמצעי החוקרים תשאלו את משתתפי הסדנה בדבר מדיניות ניהול הנגר והפרקטיקות, הנהוגות ביישובים המוכרים להם, ובדבר החסמים שמונעים הפצה ומימוש רחבים יותר של הגישה והפרקטיקות החדשות.

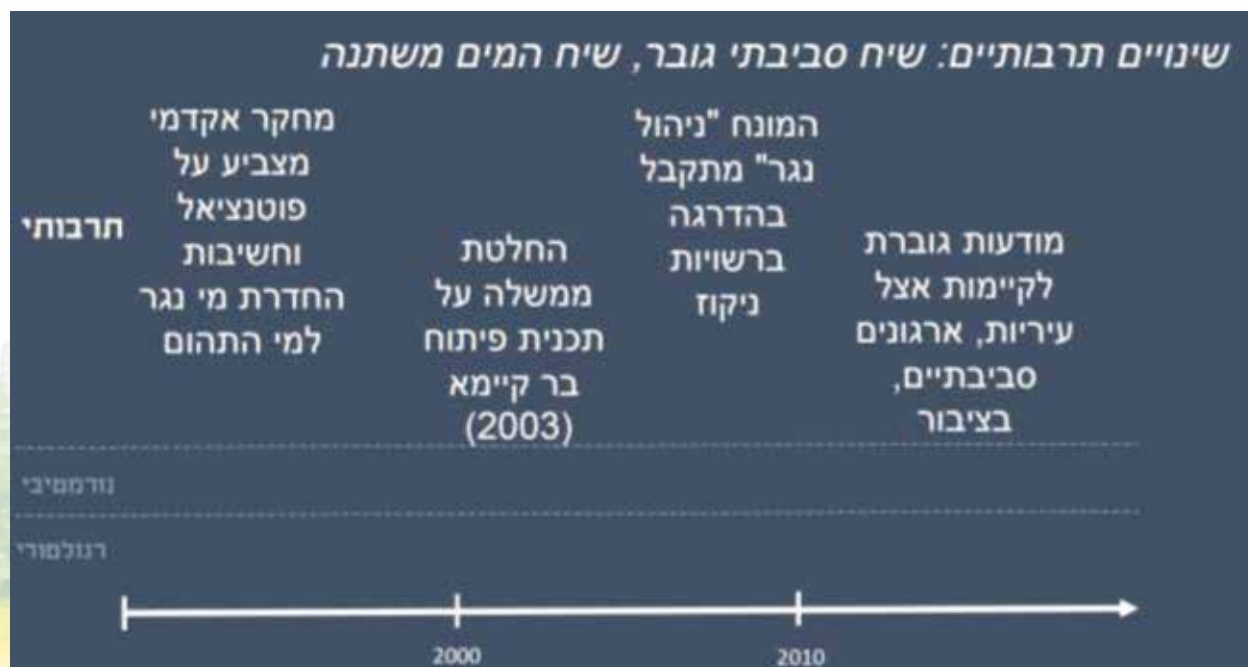
(ד) סדרת ראיונות עם אינפורמנטים רלבנטיים, כולם מביין העוסקים בפועל בניהול נגר, כולל: עובדי רשות המים, רשויות הניקוז, עיריות, בעלי משרדים פרטיים לניקוז ולאדריכלות נוף וגם חוקרים מן האקדמיה.

2. עבוד הערכת היישום של פרקטיקות לניהול נגר בישראל

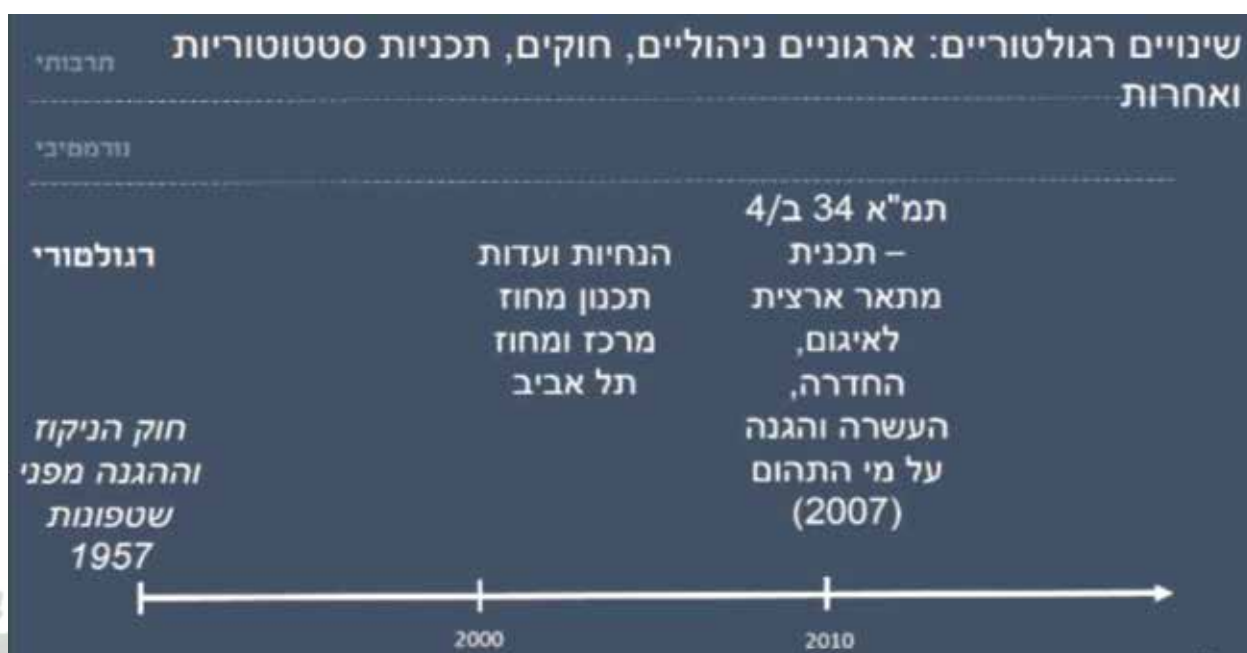
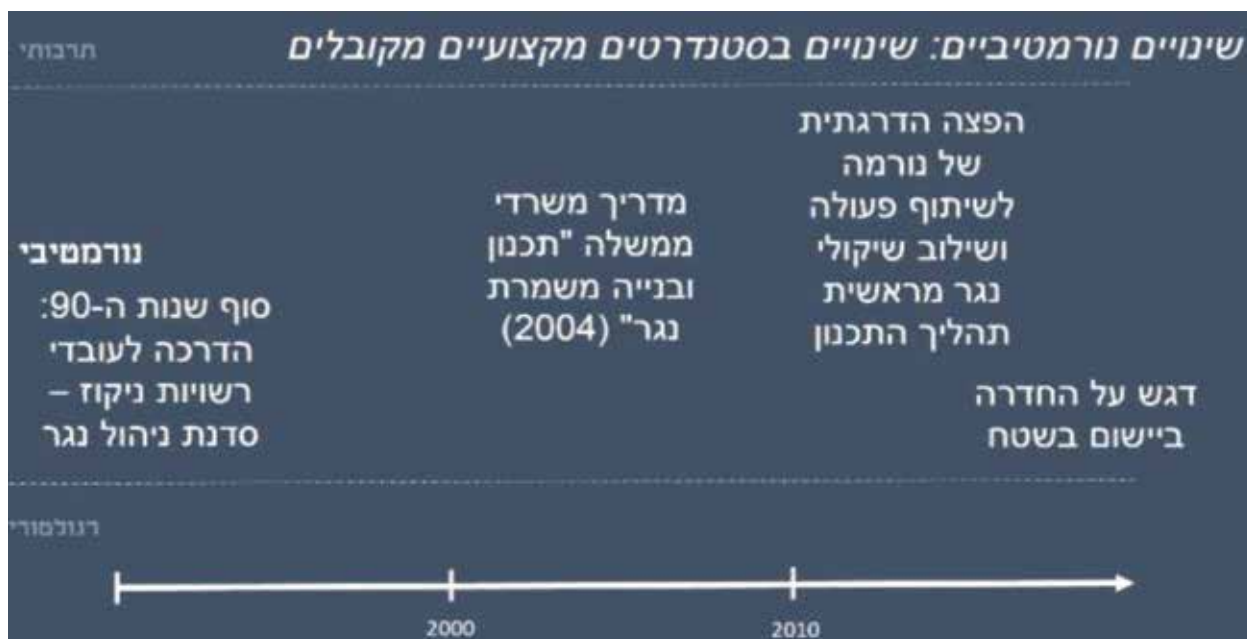
- (א) סקירת ספרות בינלאומית וישראלית בדבר שיטות הערכה של פרקטיקות לפיתוח בר-קיימא בכלל ונגר עירוני בפרט;
- (ב) זיהוי פרויקטים נופיים בישראל, בקני מידה שונים, שבהם שולבו פרקטיקות מגוונות של טיפול בנגר, בדרך כלל נגר עירוני;
- (ג) קיום קורס בטכניון, שנפתח למשתלמים לתואר שני וסטודנטים בסוף לימודיהם לתואר ראשון, מן המסלול לאדריכלות נוף, לתכנון ערים ואזורים ולהנדסה אזרחית וסביבתית; מטלת הסיום בקורס זה הייתה הערכה של פרויקט נופי נבחר, המיישם פרקטיקות של ניהול נגר.
- (ד) פיתוח שיטת הערכה ייחודית, כולל התייחסות לסוגיות של מטרות ואינדיקטורים למדידת השגתן, שיקלול והצגה גרפית נוחה להצגה;
- (ה) בחירת מספר קטן של פרויקטים מבין אלה שזוהו עבור איסוף אינטנסיבי של נתונים, שמאפשר הערכה, בהתאם לשיטה שפותחה; ביצוע ההערכה והצגתה במלל ובגרפיקה.

3. תוצרי ביניים של פרויקט המחקר

3.1 ניתוח מדיניות ניהול הנגר בישראל לאור שינויים תרבותיים, נורמטיביים ורגולטיביים.⁴

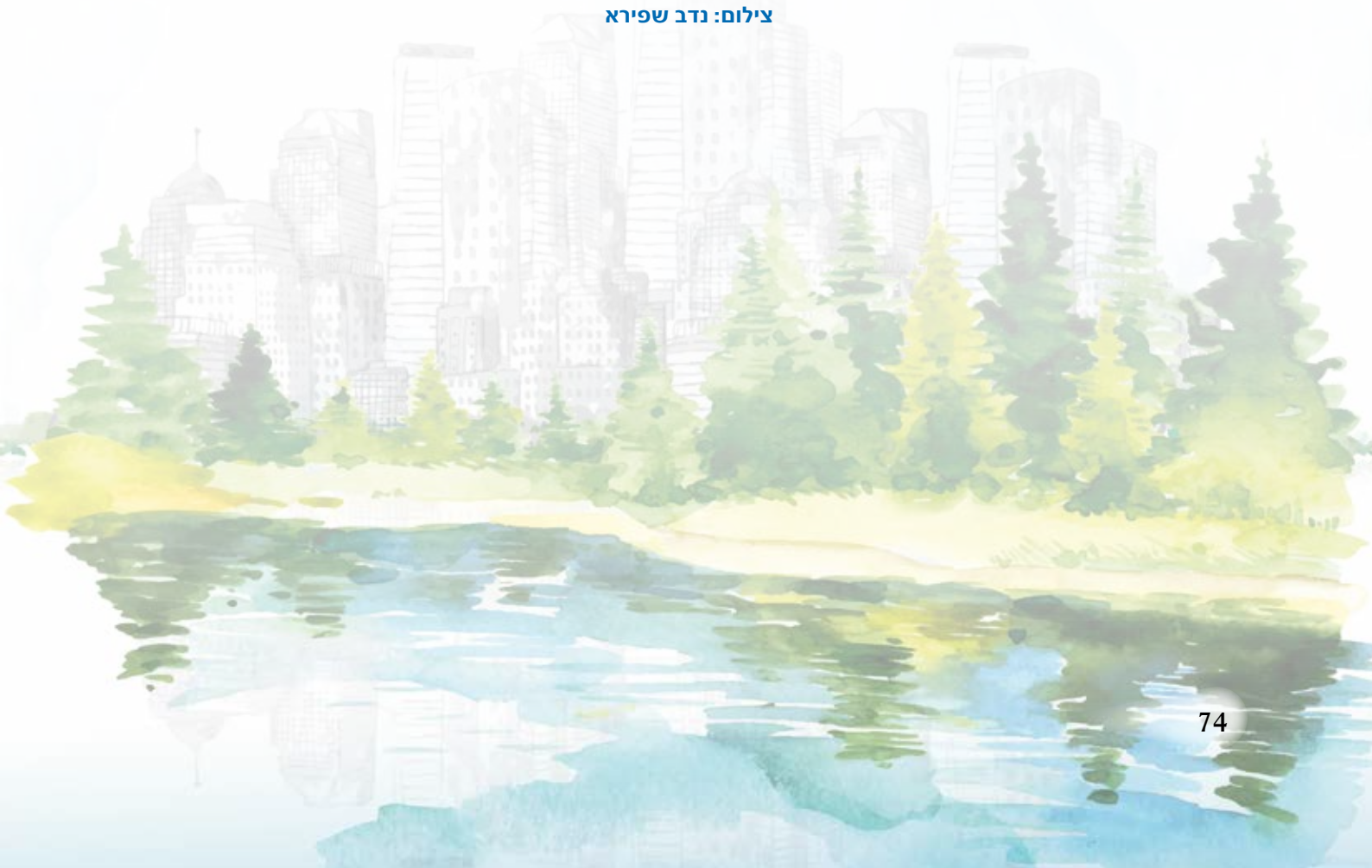


⁴ Scott, W.R., (2013). *Institutions and Organizations: Ideas, Interests, and Identities*. SAGE Publications





פארק האגמים, ראשון לציון. תכנון: חיים כהנוביץ אדריכלות נוף
צילום: נדב שפירא



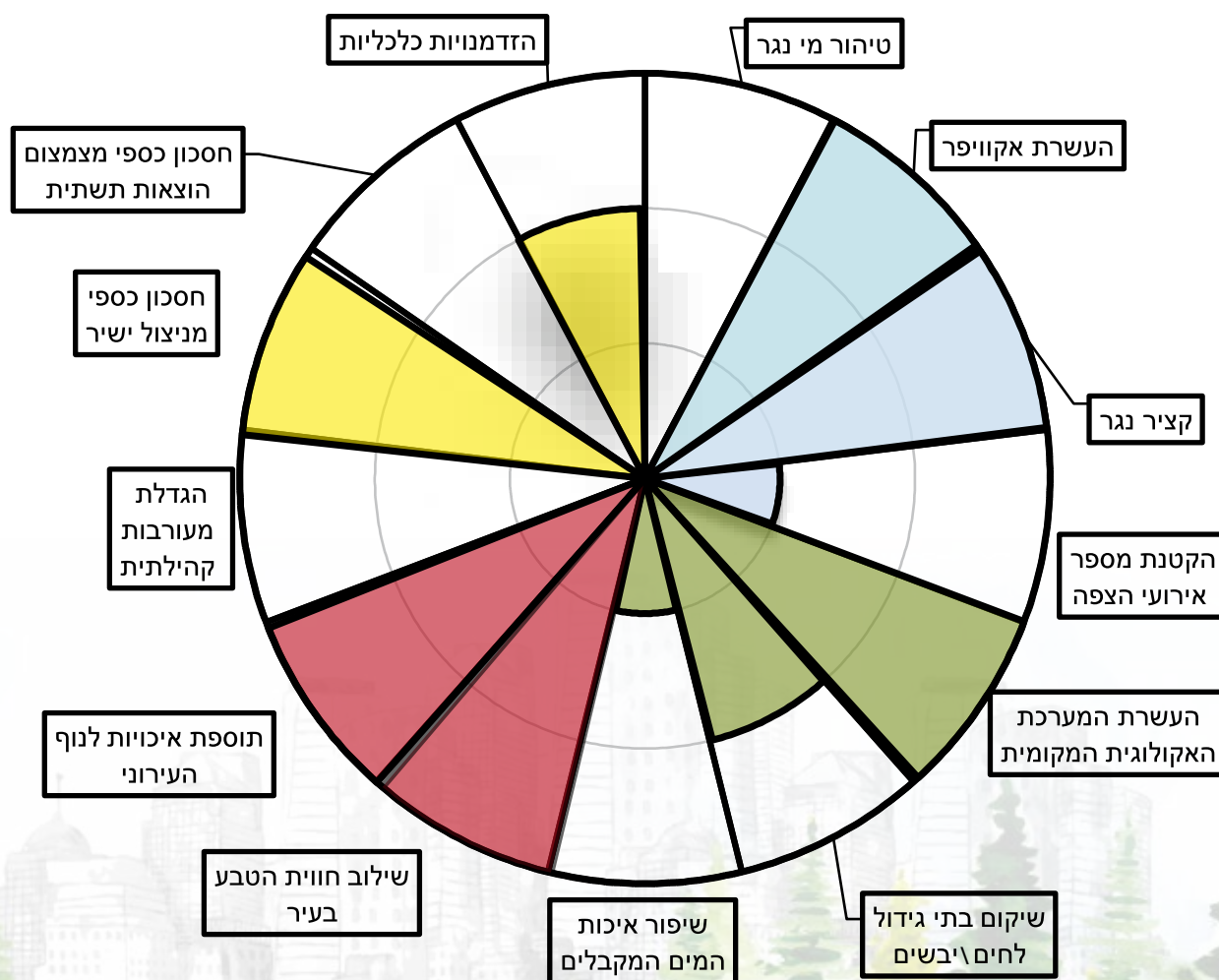
3.2 איתור פרויקטים נופיים המטפלים בנגר בישראל וסיווגם לפי קטגוריות שונות

פרויקטים	עיר	קנה מידה מרחבי	מורפולוגיה
1. בית SAP	רעננה	מבנן	נקודתי
2. גן גורדון	רעננה	מבנן	נקודתי + מרחבי
3. בריכת חזקיהו	ירושלים	מבנן	מרחבי
4. כיכר המעיין	פקיעין	מבנן	לינארי + מרחבי
5. פארק רייניש	נשר	מבנן	לינארי
6. ביופילטר רמלה	רמלה	מבנן	לינארי
7. יבנה הירוקה	יבנה	שכונתי	נקודתי
8. ביופילטר בת ים	בת ים	שכונתי	לינארי
9. גני תקווה מערב	גני תקווה	שכונתי	נקודתי + מרחבי
10. בריכת דורה (שכונת אגמים)	נתניה	שכונתי	מרחבי
11. שכונת רמות	ב"ש	שכונתי	מרחבי
12. כ"ס הירוקה	כ"ס	שכונתי	נקודתי + מרחבי
13. נאות שושנים	חולון	שכונתי	נקודתי + מרחבי
14. קריית מאיר	ת"א	שכונתי	נקודתי
15. גינזון אקולוגי	ניר עוז	שכונתי	מרחבי
16. פארק הרצליה	הרצליה	עירוני	לינארי + מרחבי
17. פארק כ"ס	כ"ס	עירוני	נקודתי + מרחבי
18. אגם סופרלנד + אגם הנקיק	ראשל"צ	עירוני	מרחבי
19. אגם מונפורט	מעלות	עירוני	מרחבי
20. פארק עמק הצבאים	ירושלים	עירוני	מרחבי
21. ביופילטר כ"ס	כ"ס	עירוני	מרחבי
22. חורשת נאות לון	ב"ש	עירוני	מרחבי
23. פרויקט בתי הספר	30 מקומות שונים	רשתי	נקודתי
24. נחל רבה	ראש העין	עירוני	לינארי + מרחבי
25. נחל עין זהב	ק"ש	עירוני	לינארי + מרחבי
26. נחל ב"ש	ב"ש	עירוני	לינארי + מרחבי

3.3 פיתוח מודל הערכה לפרויקטים משמרי נגר בישראל

מודל ההערכה בוחן את מידת השגת המטרות השונות של הפרויקט. למודל שני מרכיבים: הערכת מידת השגת המטרות השונות. חישוב הסינרגיה הסימולטנית של הפרויקט.

1. הערכת מידת השגת המטרות השונות במניפה על ידי מומחה מאפשרת לבחון את יחסי הגומלין בין המטרות השונות וכן לבטא את המדיניות העירונית הנותנת משקלות שונים למטרות שונות. בתרשים מבטא כל צבע את סוג המטרות השונות וכל פלח מרכיב שונה של המטרה.



2. חישוב הסינרגיה הסימולטנית של הפרויקט מבוסס על חישוב מספר התועלות של הפרויקט בפועל ביחס לסך כל התועלות האפשריות.

$$Goal Value \times \frac{N. goal achieved}{Total goals} = \%simultaneously synergy$$

3.4 ניקוז/ניהול נגר בערים – תמונת מצב (חלק מסיכום סדנה שנערכה בטכניון במרץ 2017)

- אין לעיר מדיניות ברורה / הנחיות כתובות לניהול נגר – נציגי עירייה אחת בלבד דווחו על מדיניות ברורה, בשלוש עיריות כתיבת הנחיות לניהול נגר נמצאת על שולחן העבודה, ואילו בערים אחרות אין מדיניות ברורה ו/או הנחיות כתובות.
- אין תכניות אב לניהול נגר בעיר.
- חסרה סמכות עירונית שעוסקת בכל ההיבטים של ניהול נגר - בניגוד לתחומי מים וביוב, המנוהלים כיום על ידי התאגידים, ניהול נגר מופקד בידי גופים שונים ביישובים השונים, ולעיתים מתחלק בין כמה גופים בתוך אותה עירייה, כולל: מחלקת תשתיות, מחלקה לשיפור פני העיר, מחלקה לתיעול.
- עיריות במורד סובלות מזרימות המגיעות מן המעלה – חסר תכנון אגני.
- לרשויות הניקוז יש סמכויות, אך חסרים תקציב וכוח אדם מיומן.
- ניסיונות להחדרת נגר לקרקע, שמתבצעים בשנים האחרונות ברוב הערים, נתקלים בבעיות – בין הסיבות:
 - תכנון לקוי גורם להצפות;
 - חסרות הנחיות תכנון ברורות, במיוחד לגבי תקופות חזרה מתאימות: 5, 20, או 100 שנה.
 - פערים בין תכנון להיתרי בנייה וביצוע;
 - בורות חלחול נסתמו; דרושה תחזוקה ואין מודעות לכך ו/או אין תקציב לכך;
 - הציבור מתלונן, כי בחורף חוששים מיתושים וטביעה במים, ובקיץ לא מרוצים מן המראה היבש.
 - חסר ייעוץ הידרולוגי, היכן מתאים ולא מתאים להחדיר נגר.
 - חסרה התייחסות לאיכות הנגר, המגיע משימושי קרקע שונים: מגורים, כבישים, אזורי תעשייה.
 - אין אכיפה - בדרך כלל אפילו אין בדיקה של התאמת הביצוע לתכנון, בוודאי לא אכיפה לאורך זמן.



עמק הצבאים, ירושלים. תכנון: רחל וינר אדריכלות ונוף, וינשטין ועדיה אדריכלים.
צילום: לירון הרשקו (2015)

4. מסקנות ראשוניות בהיבטי המדיניות

ניהול בר קיימא של נגר עירוני – חסמים עיקריים בפני יישום גישת תר"מ (תכנון רגיש למים)

עקרונות הגישה אינם מוכרים – אומנם, רבים מבעלי המקצועות הרלבנטיים מכירים את הסיסמה ש"הנגר הוא משאב ולא רק מטרד", אך עבודתם בעיר עדיין מושפעת רק או כמעט מן המטרה של הקטנת הצפות. חלקם מכירים גם את המטרה של העשרת מי התהום, באמצעות החדרה, אך מתקשים ליישמה (ר' לעיל). מטרות ירוקות וחברתיות, כמו גם האפשרות לחסוך בהוצאות ניקוז בעזרת תשתיות ירוקות, אינן מוכרות, או נחשבות לבלתי אפשריות להשגה, בהעדר ידע בדבר העקרונות והכלים של תר"מ ובשל אי היכרות עם פרויקטים מרובי מטרות שהצליחו.

- תמ"א 34 ב/4 מתפקדת כיום כחסם בפני ניהול בר-קיימא של נגר עירוני – תכנית מתאר ארצית זו מצליחה להעביר את המסר שהנגר הוא משאב ושחובה להשתמש בו להעשרת מי התהום, אולם היא ממקדת כמעט את כול השינוי התכנוני הנדרש בערים בהחדרת נגר לקרקע. היא אינה מכוונת להשגת התועלות הפוטנציאליות החשובות האחרות שטמונות בניהול בר-קיימא של נגר עירוני, וגם אינה מתחשבת בחיוניות התכנון על-פי תנאים מקומיים (site specific).

- חסרה חלוקה ברורה של סמכויות בין רשויות הניקוז למנהלי הנגר בתחומי הערים – יש מפגשים בפורומים אחדים, אך אין הסדרה קבועה של סמכויות ושל התיאומים הנדרשים.
- חסרה מודעות של הציבור הרחב לנגר, כמשאב עם תועלות פוטנציאליות לפרט ולכלל – התוצאה היא התנגדות ציבורית שכיחה לפרויקטים שכרוכים בהשהיית מים.
- חסרים בעלי מקצוע עם הכשרה מתאימה – הכשרה לניהול בר-קיימא של נגר חסרה במיוחד למהנדסי מים וניקוז; רווחת קצת יותר בקרב אדריכלי נוף.
- חסרים תמריצים כלכליים/כספיים למי שמוכן להשקיע בשימור והפקת תועלות מנגר עירוני – דרושים תמריצים מן הרשויות המרכזיות לעיריות ומן העיריות לתושבים, אשר מספקים פתרון מועיל לנגר בתחומם, ובמקביל לחייב פרויקטים שמעמיסים על המערכת הקיימת.

פרויקט 4.2: הדגמת יכולות להשבת מי נגר עירוני בישראל (מקרה בוחן - כפר-סבא)

מבוא

ישראל, אשר משק המים שלה מתבסס בהדרגה על מים מותפלים, עדיין לא הפנימה את ההזדמנויות הכלכליות, החברתיות והנופיות הגלומות בהשבת מי נגר עירוני. לכן, בעת שיטפונות בערים בתקופת החורף מי הנגר העירוני מסולקים במהירות, לעיתים תוך גרימת נזקים כבדים לנחלים העירוניים, לרבות הסעת ספקטרום רחב של מזהמים לחופים ולים. בעקבות העיור המואץ בישראל וצמצום שטחי החלחול הטבעיים, צפויה ירידה משמעותית במילוי הטבעי של אקוויפר החוף. הגשם, כשהוא פוגש באספלט, בריצוף או בגגות סוחף עמו כל מה שנקרה בדרכו אל הנחלים והים ומזהם אותם במתכות כבדות, נוטריינטים כגון חנקן וזרחן, וטווח נרחב של חיידקים גורמי מחלות. בנוסף, הערים בישראל גדלות בהתמדה והופכות צפופות יותר, חמות יותר ומזוהמות יותר. במקביל, בעקבות דיכון יתר בעבר, אקוויפר החוף הפך למזוהם בחנקות באזורים מסוימים, דבר שהביא להשבתה של כ-50% מהבארות לאורך החוף.

על פי ההערכות, עד שנת 2050, למעלה מ-160 מיליון מטרים מעוקבים של מי נגר שפירים ישתחררו לים מהערים בישראל. מדובר בהערכה בלבד, שכן מחקר פוטנציאל מי הנגר העירוני בישראל נמצא בעיצומו (פרויקט 1.2 בחוברת זו). למרות זאת, ניתן להסיק כי השבת מי נגר בקנה מידה רחב תאפשר תוספת של מקור מים חדש למשק המים אשר ניתן יהיה לנתב ישירות להחזרה לאקוויפרים מקומיים לשם העשרתם ושיפור איכותם. תועלת נוספת הנגזרת מתפיסה והשבה של מי הנגר היא שיפור איכות החיים בערים באמצעות תועלות מיקרו-אקלימיות והיכולת לייפות את הנוף העירוני כל זאת במופע ירוק פונקציונאלי.

לשם ההדגשה, אי תנועה קיים מוגבה בדרך כלל, ולכן בזמן שיטפון הוא מסלק ממנו את המים ולכן מהווה למעשה אלמנט פאסיבי. לעומתו, אי תנועה רגיש מים מסוג ביופילטר יהיה בהכרח מונמך מגובה הכביש ולכן יאפשר ניתוב מי הנגר אליו. הביופילטר יטהר את המים וידאג להחדיר את המים למי התהום או לשימושים אחרים.



איור 38: ימין, מערכת ביופילטר סכמתית בקונפיגורציה של אי תנועה, שמאל, מערכת ביופילטר בוויקטוריה פארק, סידיני, אוסטרליה. צילום: ירון זינגר

כדי ליישם קציר והשבה של נגר בישראל, חיוני לבחון ולפתח טכנולוגיות מותאמות לתנאים ולצרכים המקומיים. המטרה של פרויקט זה היא לבחון ולהדגים טכנולוגיות טיפול במי נגר שפותחו באוסטרליה, שתכליתן להשיב מים מטופלים לצורכי שימוש מגוונים (לא לשתייה באופן ישיר), ולהגן על מבנים ומובילי מים בערים בישראל. הפרויקט מתוכנן להדגים את הגישה של תכנון עירוני רגיש מים (תר"מ) בישראל, תוך הצגת תכלית של אופן ניהול מערכות מי נגר לשפר את הנוחות של המרחב העירוני וליצירת תשתיות ירוקות לאיכות חיים גבוהה.

ביופילטרים לטיפול במי נגר ולהשבתם נחשבים לאחת הטכנולוגיות המבטיחות במסגרת מימוש עיר רגישת מים אשר יעילותה הוכחה באופן מובהק באוסטרליה ובסינגפור. ביופילטרים, או בשמם הנרדף 'גינות גשם', נבנים בדרך כלל כתעלות או כאגנים המכילים מצעי סינון שנבחרו באופן הנדסי קפדני, ובהם משלובים צמחים ייחודיים. מערכת היברידית זו, שנבנת בימים אלו כפילוט עולמי בכפר סבא, מסוגלת להרחיק ביעילות סדימנטים, מתכות, נוטריינטים ואף חיידקים מחוללי מחלות. הצמחים שבהם נעשה שימוש בביופילטרים נהנים מסבילות לתנאי רוויה או ניקוז ומספקים מופע נופי ירוק. המערכות הנן גמישות בגודלן ובעיצובן, ולעיתים קרובות הן מותקנות בגנים ציבוריים, לאורך הרחובות ובכיכרות בעיר כאלמנטים המייפים את הנוף העירוני.

יחד עם זאת, אף מערכת מסוג זה לא הוקמה ולא נבנתה בתנאים של ישראל (אשר שונים מבחינת פירוס המשקעים השנתי ביחס לאוסטרליה ולסינגפור). מערכת להשבת מי נגר עירוני מצריכות אוגר מתאים מבחינת עלות-תועלת, במיוחד במקומות שבהם הביקוש וההיצע הם עונתיים, כמו ישראל. מגוון של פתרונות איגום נמצאים בשימוש, אולם כאשר הגיאולוגיה מאפשרת, השימוש באקוויפר כאוגר תפעולי נמצא הכלכלי ביותר. גישת קידוחי החדרה/הפקה כוללת לעיתים מתקני טיהור של מי נגר בקנה מידה רחב יחד עם קידוחי החדרה ישירים למי התהום. אולם, יש לבחון את השימוש בבארות חלחול קומפקטיות המוזנות גרביטציונית והמסוגלות לתמוך בהחדרה מבוזרת של מי הנגר.



איור 39: הביופילטר בכפר סבא בקונפיגורציה של אמפיתאטרון

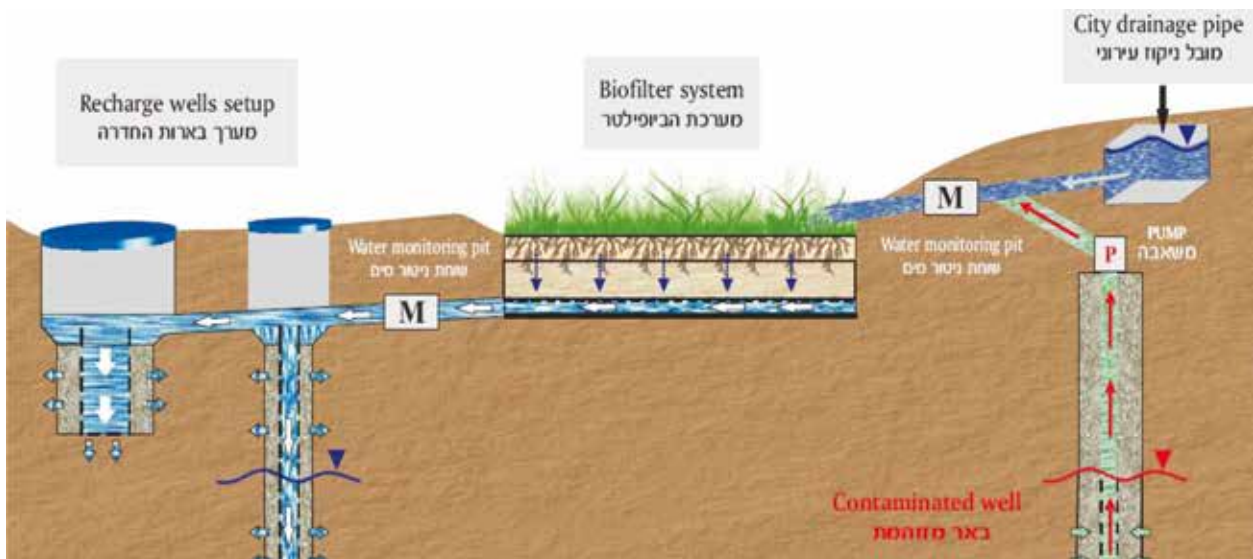
תכנון והקמה של פיילוט הביופילטר בכפר-סבא

לשם בחינת ההיתכנות של "תכנון עירוני רגיש מים" בישראל הוקם בכפר-סבא מתקן ביופילטר ייחודי בארץ. מערכת החלוץ מוקמה בפארק העוטף את "השכונה הירוקה" החדשה שמוקמת בצפון מערב העיר, כ-17 ק"מ צפונית-מזרחית לתל אביב. מערכת ייחודית זו תוכננה לקלוט, לטהר ולהחדיר מי נגר עירוני במשך העונה הרטובה בחורף, יחד עם בחינת טיפול במי תהום מזהמים במשך העונה היבשה (איור 40). כלומר, מערכת הביופילטר נבנת כמערכת דו שימושית ורב עונתית (חורף/קיץ) אשר במידה ותוכיח את עצמה תהווה נדבך של פיתוח ירוק פונקציונאלי לאורך כל השנה בתנאים האקלימיים והגיאוגרפיים הייחודיים הקיימים בישראל. בנוסף לכך, הפרויקט בוחן אפשרויות שונות של שיטות החדרה. לרווחת התושבים, המערכת הוקמה במופע נופי של אמפיתאטרון (איור 39) היכול להוות מוקד לאירועים קהילתיים עבור כ-350 איש ואשר משתרע על פני שטח של 1,500 מ"ר.



איור 40: הביופילטר לאחר אירוע גשם

תכנון הביופילטר התבסס על ההנחיות האוסטרליות שעברו התאמה לתנאים המקומיים. שטח הביופילטר עומד על 87 מ"ר והוא בנוי כמצע מנותק באמצעות יריעת איטום וכולל חמש שכבות של מצעי סינון וטיהור בעומק כולל של 1.2 מטר. השכבה התחתונה מיועדת להיות רוויה באופן קבוע ובה נעשה שימוש בתוסף של תורם אלקטרוני (מקור פחמן) וזאת כדי לאפשר דנטרפיקציה מיטבית (הרחקת חנקן). השכבה העליונה בביופילטר היא שכבת חול קרקע מנוקזת (באספקה מקומית) אשר תומכת בצמחייה הייחודית ומאפשרת תהליכי פירוק מזהמים תלויי חמצן. מערכת הביופילטר נשתלה כשישה חודשים בטרם ניטרה, וכוללת 12 סוגים של צמחים שונים כאשר 50% מהם הינם מינים אוסטרליים שהוכיחו יעילות גבוהה בהרחקת מזהמים תוך שמירת יכולת סינון גבוהה של המערכת (מניעת סתימות). קצב החלחול המתוכנן הינו בין 300-400 מ"מ בשעה.



איור 41: מערכת הביופילטר ההיברדי בכפר-סבא מציגה עקרון פעולה דו שימושי ורב עונתי (קצירת מי נגר בחורף ו'דיאליזת' אקוויפר בקיץ).

החדרה ו/או חלחול כפתרון קצה להשבת מי נגר עירוני

הרציונל המרכזי בפתרון קצה של החדרה ו/או חלחול הינו לאפשר להעשיר את מי התהום במקור מים חדש, ובכך לפצות על הגירעון החמור באקוויפר החוף אשר נגרם בעיקר בהעדר חלחול טבעי לאור השטח הבלתי חדיר שגדל משמעותית בערים. האתגר המרכזי היה למצוא טכניקה cost effective שתאפשר שימוש נרחב בהמשך. בנוסף, הכוונה היא להשתמש במי התהום העליונים שיוחדרו על ידי המערכת לטובת השקיה המרחב הציבורי, ובכך לממש את אחד העקרונות המרכזיים של "עיר רגישת מים". לצורך מלאכת תכנון מתקני החדרה/חלחול הוקם צוות ייעודי ובו חברים ההידרולוג הראשי של חברת מקורות, ד"ר יוסי גוטמן; מר נועם דבורי מחברת אתגר; ומר משה ירקוני שפיקח על העבודות בשטח. שני סוגים של העשרת מי תהום נבחנו בפרויקט: 1. החדרה ישירה לשכבת הכורכר הנחשבת המיטבית לקליטת מים לעומק של 87 מטר בקוטר של 20 ס"מ. 2. ביצוע של שלושה קידוחי חלחול רדודים (לעומק של 24 מטרים ובקוטר של 1 מטר), כמטר אחד מעל מפלס מי התהום המקומי.

הקמת הביופילטר

בניית הביופילטר שהחלה ב-2009 נועדה להימשך שלושה חודשים, אך התעכבה עקב שיטפון עז שהתרחש באתר (ביממה וחצי ירדה שליש מכמות המשקעים השנתית לאזור זה). לאחר השלמת העבודות במקום, ושישה חודשים של התבססות מחודשת של הצמחייה, הפכה המערכת לפעילה ועמדה הכן לקליטת מי נגר עירוני דיגום וניטור לקראת החורף 2010-2011 ו-2011-2012.

ספיקות הכניסה והיציאה מהביופילטר נוטרו באופן רציף (בהפרשים של דקה אחת) לאורך עונת הגשמים הראשונה של פעולת הביופילטר 2010 עד מאי 2011 כאשר דיגום פתגוניים נמשך עד מאי 2012. בתקופה הנ"ל, לאורך 16 אירועי גשם, נדגמו דוגמאות תלויות זרימה מהכניסה ומהיציאה מהביופילטר. האנליזות בוצעו במעבדה מוסמכת מטעם משרד הבריאות עבור המזהמים הבאים: מתכות כבדות כללי ומומס (26 יסודות), מוצקים מרחפים (TSS),

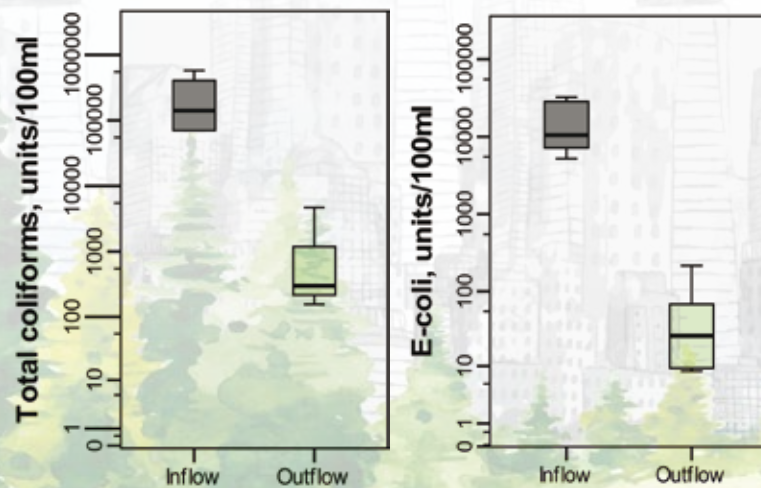
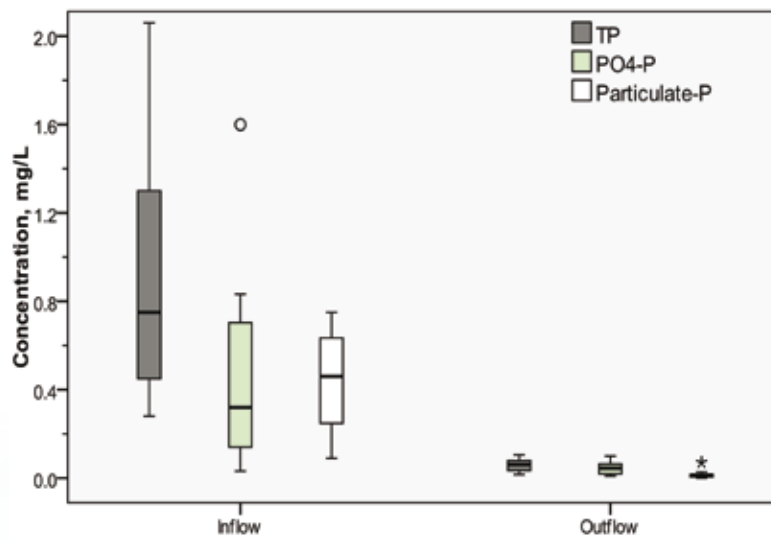
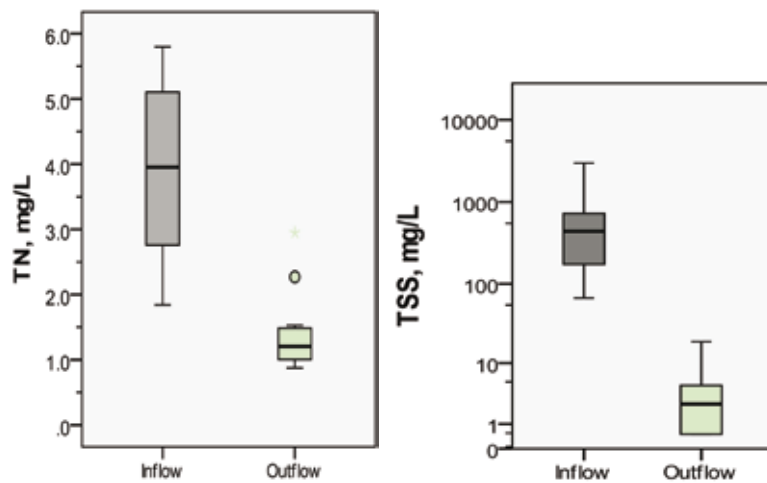
וכן חיידקים פתוגניים (אי-קולי, קולי-צואתי, וקוליפורמים כללי). בנוסף נמדדו ספיקות בכניסה וביציאה מהביופילטר לרבות קצב החדרה לאורך זמן לכל אחד מסוגי בארות החדרה. התוצאות נותחו סטטיסטית, ורמות הזיהום סוכמו הן לגבי מי נגר עירוני גולמיים והן לגבי המים המטופלים ביציאה מהביופילטר. התוצאות שהתקבלו הושוו מול מספר תקנים ישראלים: תקני איכות מי שתיה של משרד הבריאות משנת 2000; תקן ועדת ענבר למי קולחין לצורכי השקיה בלתי מוגבלת; בנוסף, השוותה איכות מי הנגר המטוהרים לאיכות קולחין המיועדים להחדרה במתקני החדרה גדולים בישראל. (ניטור הניטראט ומדידתו נעשו בתמיכה ובמימון רשות המים תוך ביצוע האנליזות במעבדה במכון וולקני).

במהלך העונה היבשה נבחן הטיפול במי תהום מזוהמים (דיאליזת אקוויפר). תחילה בספיקות נכונות (2-3 מ"ק ליום), ולאחר מכן, בשלושה ניסויים מנתיים, בהם הוזרמו 50 מ"ק של מי תהום מזוהמים לביופילטר כדי לבחון את תפוקתו המרבית. בעונת היובש השנייה לפעולת הביופילטר נעשה ניסיון לבצע אופטימיזציה של משטר הזרימה לטיפול במי תהום (נפח כניסה וזמן הפוגה) במטרה למקסם את יכולת ההרחקה של החנקות במי תהום.

השבת מי נגר עירוני

בתקופה הרטובה בין דצמבר 2010 למאי 2011, כאשר כמות המשקעים הייתה מתחת לממוצע השנתי, קצר מתקן פיילוט הביופילטר 1,411 מ"ק של מי נגר עירוני, כאשר 85% מהם טופלו והוחדרו למי תהום. כמות זו מהווה 5% מתחת לערך המטרה (שהוצבה על פי היכולות של מערכות דומות באוסטרליה).

המחקר מצא שמי הנגר בכפר-סבא מזוהמים מעל הממוצע בהשוואה למי נגר "אופייניים" כפי שתועדו במספר מחקרים בערים אחרות בעולם (חציון של ריכוזי EMC, TSS, TN, ו-TP היה פי שניים לערך הגבוה של ריכוז זרחן שתועד במי נגר עירוני אופייניים באירופה, בארה"ב ובאוסטרליה). גם ריכוזי המתכות שנמדדו הינם גבוהים יותר ממה שמתועד בספרות העולמית, כאשר ברזל ואלומיניום היו חריגים באופן בולט מעל לתקן ההשקיה בישראל שנקבע על ידי ועדת ענבר ב-2010. רמות חיידקי האי-קולי שנמצאו היו בתחום הטווח הצפוי, כלומר רמה גבוהה של זיהום המגביל שימוש ישיר במי נגר עירוני להשקיה. הנוכחות הגבוהה של מוצקים מרחפים ומתכות מהווה בעיה יוצאת דופן במידה והמים מופנים להחדרה לאקוויפרים, במיוחד בארות החדרה/חלחול הנוטות להיסתם עקב כניסה של סדימנטים.



איור 42: ריכוזים ממוצעים לאירועי גשם-נגר בכניסה (מי נגר גולמיים - לפני טיפול בצבע אפור) וביציאה מהביופילטר (מי נגר מטוהרים - לאחר טיפול בצבע ירוק)

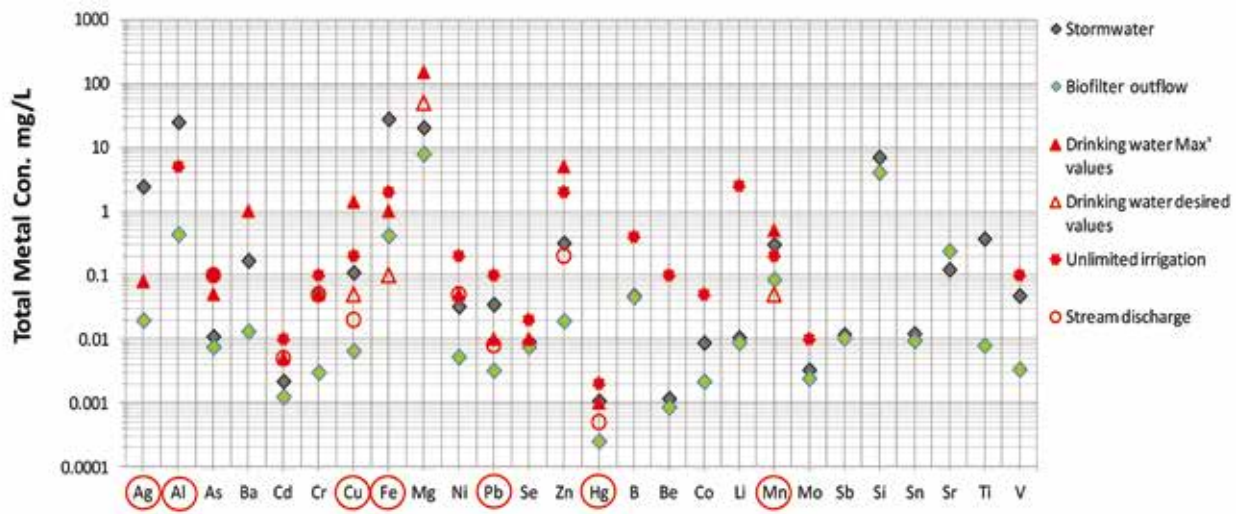


איור 43: בקבוקי דיגום מי נגר בכפר-סבא לפני ואחרי טיפול בביופילטר. צילום: ירון זינגר

איכות המים שנמדדה לאחר הטיהור בביופילטר לא עמדו בתקן מי שתיה של משרד הבריאות (2000) בכל הנוגע להימצאות אי קולי וכלל קוליפורמים (איור 43). מכך הוסק כי ריכוזים גבוהים של מוצקים מרחפים, חיידקים מחוללי מחלות ומתכות במי הנגר העירוני בכפר-סבא מגבילים החדרה לאקוויפר או כל שימוש אחר של מים שפירים לרבות התקן ל"השקיה בלתי מוגבלת". ובמילים אחרות, נמצא כי מי הנגר העירוני בכפר סבא אינם עומדים באף תקן איכות מים מוכר במדינת ישראל לרבות זה של אוסטרליה וניו-זילנד.

עם זאת, כפי שמתואר באיור 44, איכות המים של מי הנגר המטוהרים הייתה מקבילה לאיכות מים של קולחין שעברו טיפול אקסטנסיבי (שלישוני) המאפשר החדרה לאקוויפר לשם העשרתו בישראל. כך למשל, כל המתכות הכבדות שנדגמו ביציאה מהביופילטר היו מתחת לערכי התקן המקסימליים המותרים במי שתייה. שיעור הרחקה חיידקים צוואתיים הינה יותר מ-3 סדרי גודל בין הכניסה ליציאה מהביופילטר (\log reduction 3.2), תוך עמידה בתקנות ועדת ענבר ברוב האירועים, כאשר הביופילטר השיג הפחתה של יותר משני סדרי גודל של הרחקה בדרך כלל ועמד בכל יעדי התקן של שחרור מים לנחלים.

מהתוצאות גם עולה כי מי הנגר העירוני שטוהרו בביופילטר מכילים מתכות מתחת לסף הריכוז המוגדר בתקן למי שתייה. לפיכך, מים אלו הינם בטוחים להשקיה בלתי מוגבלת, וניתן להחזירם ישירות לאקוויפרים או לחילופין להזרים אותם לנחלים רגישים. לאור התוצאות הנ"ל התקבל בסיס מוצק לאפשרות של השבת מי נגר עירוני לצורכי מי שתיה.



איור 44: ריכוזים ממוצעים של מזהמים לאירוע גשם עבור מתכות כבדות בכניסה לביופילטר (באפור) ומי נגר מטוהרים ביציאה מהביופילטר (בירוק) בהשוואה לתקני איכות מים שונים (באדום)

הביצועים ההידראוליים (מוליכות הידראולית - קצב חידור) של הביופילטר הינם בגדר הצפוי, כאשר במשך שלושת החודשים הראשונים לפעולתו ירדה המוליכות ההידראולית לערך של 30 מ"מ לשעה, אך בארבעת החודשים שלאחר מכן חידש הביופילטר את יכולת קצב החידור שהתייצבה על יותר מ-300 מ"מ לשעה. מכאן ניתן להסיק שהצמחים בהם נעשה שימוש בביופילטר הצליחו לשמור על קצב החידור בביופילטר ולאפשר את פעולתו התקינה על פי הניסיון האוסטרלי.

בחירת הביופילטר לטובת שיקום האקוויפר בעונה היבשה

רמת החנקות במי התהום של כפר סבא בפרט, ובאזור השרון בכלל, נחשבת לגבוהות בישראל, בטווח של ביו-122-144 מג"ל (תקן למי שתיה עומד על 70 מג"ל). בספיקות קליטה נמוכות (בין 2-3 מ"ק ליום) הביופילטר הראה עלייה מתמדת ביכולת ההרחקה של החנקה בשיעור של 46% עם התחלתה של ההתבססות הביולוגית של הצמחים והחיידיקים בביופילטר ועד 73% (35 מג"ל) לאחר שישה חודשים שהמערכת הגיעה ליעד מוכנות ביצוע, ולמעשה ריכוז המהווה מחצית מהריכוז המקסימלי המותר למי שתיה. יחד עם זאת, כאשר ספיקות גבוהות יותר של מי תהום מזהמים הוזרמו למערכת, יכולת ההרחקה ירדה משמעותית, כאשר הריכוז ביציאה הגיע ל-70 מג"ל לאחר שטופלו 10-15 מ"ק של מים. יכולת ההרחקה הנ"ל השתפרה כאשר המערכת חוותה הפוגה של שבועיים בין שני הניסויים, דבר המצביע על אפשרות לתפעל את הביופילטר בעונה היבשה בפונקציית מדרגה שתאפשר הפוגות. הניסויים הדגימו את היתכנות היישום של מערכת הביופילטר הרו-שימושית (תפעול שונה בחורף ובקיץ). אולם, נדרש המשך מחקר ופיתוח לאופטימיזציה תפעולית על-מנת לטפל באופן רציף בריכוזים הגבוהים של חנקה המצויים באקוויפר החוף. תוצאות פרויקט זה היוו טריגר לפרויקט 3.1, העוסק באופטימיזציה של הביופילטר ההיברידי להשבת נגר בחורף וטיהור החנקות במי תהום בקיץ.

ניטור בארות החדרה/חלחול כפתרון קצה מועדף למי הנגר המטוהרים

לשם ניטור חלופות של חלחול/החדרה לבארות נבחנו 3 בארות חלחול רחבות קוטר לצד קידוח צר קוטר ובו החדרה ישירה לעומק של 87 מטר. בין שני סוגי הבארות הותקן מד ספיקה המאפשר בידוד החלופות לשם ניטור. הבאר העמוקה, שתוכננה ליכולת החדרה של 20-25 מ"ק"ש, הראתה יכולת החדרה מקסימלית של 11 מ"ק"ש. לעומת זאת, הניסויים הראו שכל אחת מבארות החלחול הרדודות הצליחו להחדיר יותר מ-20 מ"ק"ש - ערך הגבוה בסדר גודל אחד מעל החדרת התכן שתוכננה. התצפיות שנערכו לאורך שתי שנות הפעלת המערכת הראו כי שינו צורך רק בבאר חלחול רחבה אחת כדי לענות על צורכי ההחדרה שמערכת הביופילטר מייצרת. בעקבות זאת התקבלה המסקנה כי בארות ההחדרה הרדודות הן בעלות יחס תועלת גבוה. לכן, ניתן ליישם אותן כפתרון קצה להחדרת המים המטוהרים בביופילטר בקנה מידה רחב בסמיכות למערכות השבת מי נגר (פשוט וזול יותר להקים באר רדודה לעומת באר עמוקה). בשל קרבת הבארות הרדודות למערכת הדבר יקטין גם את גל הגאות (שטפון) בעיר ובכך יקל על מערכות הניקוז הקיימות ואף עשוי לחסוך את הרחבתן. למרות שתוצאות אלו מבטיחות, יש לקחת בחשבון שהן ספציפיות לסביבת הביצוע, מאחר שיכולת ההחדרה/חלחול של הבארות תלויה בתנאים ההידרו-גיאולוגיים המקומיים.

היבטים כלכליים של פוטנציאל השבת נגר עירוני בישראל

דו"ח ההיתכנות הכלכלית שערך מר גדי רוזנטל, מנכ"ל חברת כיוון, בניתוח נתוני עלות ביצוע ויכולות הביופילטר בכפר סבא מצביע על כך שעלות קצירה והשבה של מי נגר עירוני באמצעות טכנולוגיית הביופילטרציה קטנה ב-14% מעלות של התפלת מי ים, כאשר עלות הטיפול ב-1 מ"ק של מי נגר עירוני עומדת על 2.93-3.25 שקל. זאת בהשוואה לעלות ההתפלה של 1 מ"ק העומדת על 3.6 שקל. הניתוח הכלכלי הנ"ל מבוסס על עלויות של מערכת הפילוט בכפר-סבא, אשר מטבע הדברים כמתקן חלוץ נחשבת ליקרה בהרבה ביחס למערכות דומות קיימות באוסטרליה. למעשה, הדו"ח הנ"ל לא הביא בשל זה יתרונות נוספים לעומת התפלת מי ים ובהם: 1. שיקום האקוויפר המקומי; 2. הקטנה של תשתיות הניקוז הקונבנציונליות כאשר מי הנגר מושבים במקור; 3. תועלות סביבתיות וחברתיות כגון זיהום נחלים, חופים ומקורות מים לצד יצירת אזורים ציבוריים נעימים יותר; 4. מופעי נוף ירוק בתווך העירוני המשפר את רווחת התושבים ומאפשר ויסות מיקרו-אקלימי. לאור כך ניתן להסיק כי לקצירת מי נגר עירוני ישנה היתכנות כלכלית בישראל. מערכת פילוט הביופילטר הראשונה שהוקמה בכפר סבא הינה האמצעי המוביל במסגרת גישת ערים רגישות מים ליישום של השבת מי נגר עירוני והמתו ממטרד למשאב המניב מקור מים חדש. פילוט הביופילטר בכפר-סבא מציג גישה חדשנית (היברידית) המאפשרת דו-שימושיות ורב-עונתיות המסוגלת לפעול בעילות בתנאים האקלימיים בישראל ובהתאמה לצרכים מגוונים.

מסקנות פיילוטים ובחינת מערכות קצירת נגר חדשות

מערכת פילוט הביופילטר בכפר-סבא הציגה למעשה תרחיש להשבת מי נגר עירוני וזאת כמערכת קצה הממוקמת כחלק מפיתוח חדש של פארק עירוני ואשר הנתונה לגיאולוגיה מסוימת. על כן, יש לבחון אמצעים נוספים במגוון תרחישים ובקונפיגורציות שונות, לרבות שוני טופוגרפי וגיאולוגי, וקצירת נגר במקור - עקרון מוביל בגישת ערים רגישות מים. כלומר, הרעיון הוא להמיר שטחים ציבוריים פתוחים (שצ"פ) הקיימים בפיתוח ירוק פונקציונאלי ירוק לקצירת נגר כדוגמת הביופילטר אבל לא רק. מתוך הבנה שארסנל של אמצעים וטכנולוגיות עשוי לתת מענה רחב יותר לאתגרים בערים. מערכות אלו יקלו על מערכות הניקוז הקיימות בעיר תוך שיפור רווחת התושבים. זה למעשה היה המניע העיקרי להקמת מערכות חלוץ נוספות בערים בת-ים ורמלה. מערכות אלה ישולבו כרחובות קיימים, תוך הדגמת טכנולוגיות מודולריות חדשניות שפותחו לאחרונה באוסטרליה. מערכות אלה אינן עושות שימוש בצמחים, ולכן לא צורכות מים להשקיה, ויכולתן לקלוט מי נגר אף גבוהה בהרבה לעומת הביופילטר.

ערים רגישות מים ממבטו של מתכנן // גלר ירון, ירון זינגר

ניהול הנגר העירוני או הנגר מנהל אותנו – נקודות למחשבה לקראת חורף 2017-2018

מדי כמה שנים חוזר לדיון נושא ניהול הנגר העירוני: הדעה הרווחת כי יש להתייחס לנגר העירוני כאל משאב ולא כאל מטרה, נכונה ומוצדקת. יחד עם זאת גישה זו עדיין לא מצליחה לעבור לפסים של יישום סדור בפרויקטי בניה ופיתוח, התחדשות עירונית ובניה רגישה למים. כנס שנערך לאחרונה באירופה מצביע על חשיבות ניהול הנגר העילי על רקע אי הודאות הנובעת מהשפעות שינוי האקלים על ההידרולוגיה.

מצוקת המים בישראל הביאה ליצירת תלות אקוטית במי התפלה במשק המים הלאומי. בד בבד לא השכילה המדינה לנצל את משאב הנגר העירוני. למעשה, מי נגר בערים נתפסים כמטרד ולא רק שלא מנוצל, אלא בפתרונות ניקוז מושקעים כסף ציבורי רבים שכל תכליתם סילוק והרחקת המים – לנחל, לים. סילוק זה מביא עימו לעיתים גם זיהום הכולל מגוון רעלנים.

חורף 2017-2018 עומד בפתחנו ועל פי השירות ההידרולוגי שברשות המים התחזית אינה מעודדת: התחזית היא שבחורף הנוכחי צפויה פחיתה נוספת בהיקף המטר הטבעי וכמות המים הזמינים תקטן יחסית לשנים קודמות. יחד עם זאת התחזית אינה מתייחסת לסוגיות של אירועי גשם ועוצמות הגשם, משתנים להם השפעה עיקרית על תפקוד מערכות הניקוז. זה למעלה מעשור עומדת סוגיית ניהול הנגר העילי במוקדן של עבודות אקדמיות רבות, הקוראות לאיסוף ושימוש במי הנגר, בכל רמה שהיא: פרטית, מקומית וציבורית. יחד עם זאת לא הרבה נעשה בהיבט זה במרחב העירוני. חסמים מינהליים והנדסיים כאחד מונעים יישום רחב של ניהול הנגר העילי. לניהול מי הנגר מספר תועלות ברורות להן משמעויות כלכליות ישירות ועקיפות:

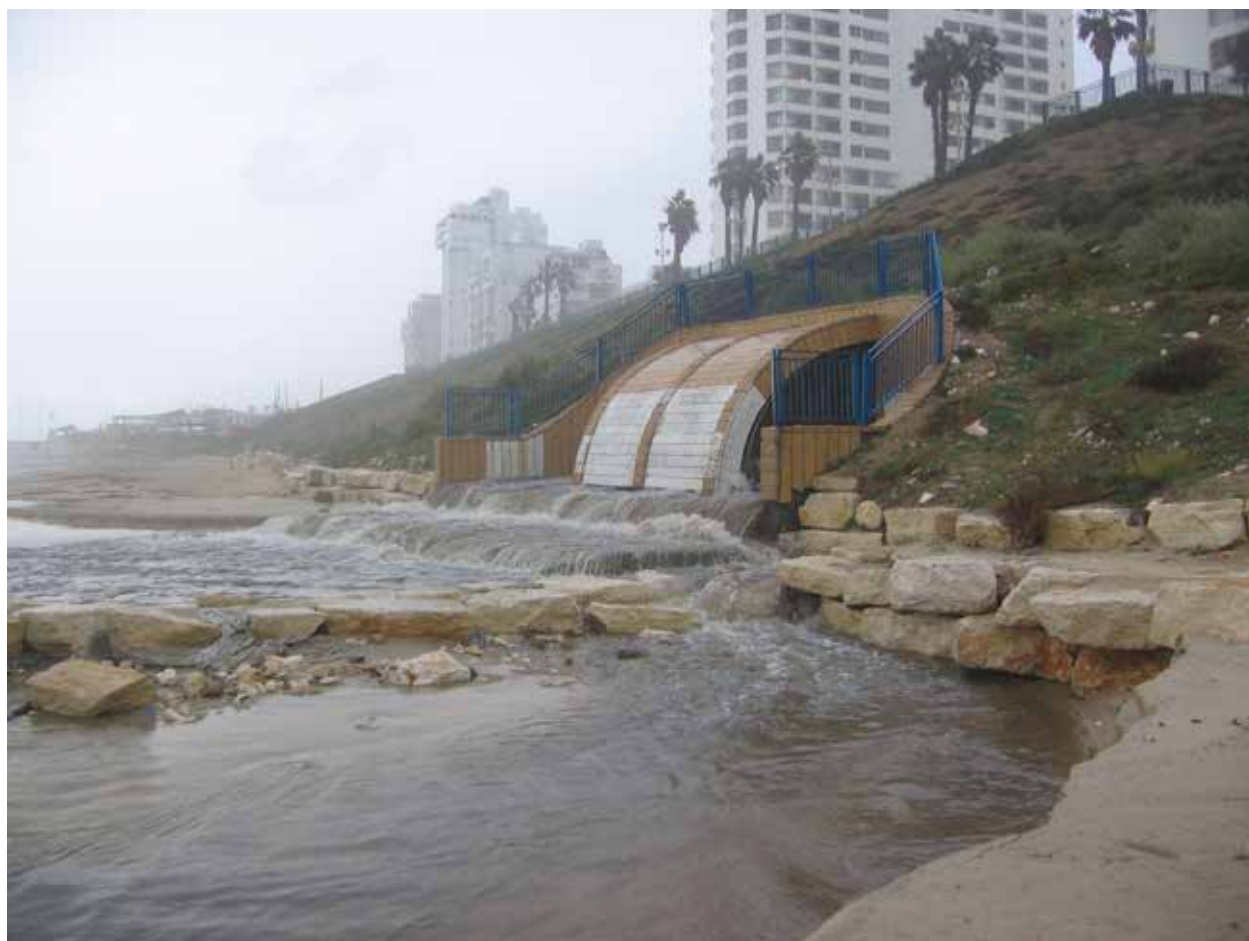
א. צמצום עובי הנגר העירוני מאפשר דחיית השקעות במערכות ניקוז ושיקום תשתיות ניקוז שאינן תואמות עוד להיקף העיור והבינוי במרחב העירוני בישראל.

ב. במקומות בהם תנאי הקרקע מאפשרים חלחול – החדרת מים לתת הקרקע נושאת עימה אפקט חיובי של העשרת מי תהום ומניעת המשך חדירת הפן הביני והמלחת אקוויפר החוף.

ג. פיתוח קיימות בתחום הניקוז ומניעת הצפות, מהווה מרכיב יסודי בחוסן עירוני (RESILIENCE). מרכיב זה מתחדד בשנים האחרונות יותר ויותר עם הבנת היקף הנזקים הכלכליים מאירועי הצפות באירופה וארה"ב.

נדרש לתת כיום דגש לחשיבות הטיפול במי הנגר, יצירת מדיניות רוחבית והתווית מנגנונים ליישום ופעילות.

שינויי האקלים גוררים עימם שינויים בהידרולוגיה ובמטר הגשמים, בעולם בכלל ובמזרח התיכון בפרט. צמצום היקף המטר השנתי ושינוי אופייני הגשם (אירועי גשם קצרים יותר ועוצמתיים יותר) מגביר את החשיבות בצמצום ספיקות ונפחי המים, באמצעות ויסות ומיתון הזרימות במקור. עיקר התובנה כיום גורסת שמערכות הניקוז אינן מהוות פתרון מלא לאירועי נגר קיצוניים הנגרמים כתוצאה מעוצמות גשם רגעיות גבוהות מאוד. בהינתן אירועים אלו נוצרות הצפות מקומיות רבות. אירוע גשם שכזה אירע רק לאחרונה בחודש 10.2017 בתחנת אגד בטבריה: עוצמת גשם רגעית גבוהה וחוסר תחזוקת מערכות ניקוז גרמו להצפה בתחנה, גלישת מים לתוך מבנה התחנה, ואנו עוד בטרם תחילתו שלחורף...



המדינה לא השכילה לנצל את משאב הנגר העירוני. צילום: ירון זינגר

הפיתוח והגידול במרכיב העיור בעיקר לאורך מישור החוף המרכזי בישראל, מביאים עימם גידול בכמויות הנגר. גידול זה בא לידי ביטוי לא רק בגידול בנפחי המים בכל אירוע גשם-נגר אלא גם בקיצור של זמני הריכוז והצטברות כמויות מים משמעותיות בזמנים קצרים. נדרשת מדיניות ארצית לתכנון וניהול מי הנגר המחולקת לפחות ל 2 קטגוריות עיקריות: פיתוח חדש כגון הקמת שכונות חדשות והתרחבות שכונות קיימות, מתחמים עסקיים, בהם נדרשת התייחסות למן התחלת שלב התכנון לצמצום הנגר העירוני, ומתחמים של התחדשות עירונית (פינוי בינוי) בהם רמת הגמישות לניהול הנגר מוגבלת יותר.

עיקר הליך התכנון והביצוע של מערכות ניקוז ומרכיבי ניהול נגר עילי מתבצע כיום ברמה המקומית. יש להעשיר את רמת התכנון המקומית בסל אמצעים וכלים, לבחינה של תכניות ניקוז ושימור נגר עילי ומנגנונים ליישום, על מנת שאלו יקרמו עור וגידים ויביאו בסופו של יום לצמצום נפחי הנגר העילי.

למעשה, נכון להיום, בהינתן הטכנולוגיות שנוסו בהצלחה ע"י המרכז לערים רגישות מים בהובלת קק"ל ניתן למעשה "לעלות כיתה" משלב המודעות לסוגיית ניהול הנגר לשלב ניהול הנגר בפועל והשבה, פעולות המייצרות משאב מים חדש בערים. המודעות ליתרונות ולהזדמנויות החבויות ביישום "ערים רגישות מים" בישראל, לא באים לידי ביטוי הלכה למעשה בשפת התכנון, דבר המהווה גורם מעכב ביישום הגישה, בפתוחות לאמצעים וטכנולוגיות,

חלקן נהוגות לא מכבר בלא מעט מדינות מפותחות באירופה, אוסטרליה וארה"ב. חלקם של החסמים נובעים בין היתר מהגדרת תחומי אחריות של רשויות וקונפליקטים הנובעים ממבנה חוקתי ורגולטיבי:

א. אחריות לניקוז הינה בידי הרשויות המקומיות שבעצם אמונה על סילוקו מהעיר. לרשות אין כל פיצוי או תגמול בגין ניהול מי הנגר, תרומה להגדלת זמינות משאבי המים וכדומה. גם לתאגיד המים המקומי האמון על מערכות אספקת המים העירונית (ע"פ חוק התאגידים) אין תגמול לפעילות זו.

ב. רשות המים, האחראית על עידוד והכוונה של פעולות להעשרת משאבי המים, אינה רשות סטטוטורית אשר יכולה לעגן פעילויות לטובת מטרה זו, אלא עליה "להתחרות" במוסדות התכנון מול תכניות אחרות, הנושאות עימן אינטרסים שונים כמובן.

ג. כל עוד האחריות בתחום ניהול הנגר העילי תהיה בידי הרשויות המקומיות חסרה סטנדרטיזציה למגוון של אמצעים שאותם יש לבחון בתנאים ובצרכים בישראל תוך הגדרת מדרג best practice. היקף הידע ברמה המקומית של התכנון לגבי טכנולוגיות וגישות חדשות בתחום, בעיקר בסוגיית ניהול איכות מי הנגר מועטה ביותר.

ד. רשות הניקוז, שהינה רשות מוסמכת לענייני ניקוז על פי חוק התכנון והבניה, עוסקת במהותה בנגר שיוצא מהעיר, קרי, מהעיר לשטחים הפתוחים. לנגר העירוני אין אבא מקצועי.

ה. ולבסוף: הנגר העירוני הינו נושא בינתחומי הנתון לרגולציה של מספר גופים כמו המשרד לאיכות הסביבה, רשות המים, רשות הניקוז, משרד השיכון ונתיבי ישראל. כל אחד מהם רואה גזרה צרה (למשל, המשרד להגנת "ממוקד" באיכות המים שמגיעה לים התיכון אינו נותן דעתו לספיקת המים וכמותם), תחום בו עוסקת רשות המים) דבר המונע יצירת מנגנון תמריצים משקולל ורגולציה אחודה.

היקף חוסר המודעות, ידע, ניסיון קודם בהקמה והפעלה של "מיקרו" מרכיבים לניהול מי הנגר מחייבת כיום הכנת הנחיות ארציות לתכנון ראוי של מרכיבים לניהול נגר, ועידוד יישום מעשי. להלן הצעות פרקטיות:

א. יישור קו תודעתי - יצירת מודעות לבעיה ולפתרונות ישימים המתאימים לתנאי האקלים וההידרולוגיה בישראל. מחוייב הגדרת מנגנון עידוד ויצירת ההזדמנויות לרשויות ומועצות מקומיות. ללא מנגנון פיצוי בגין עשייה - יש לצפות למעט תגובה מצד דרג השטח.

ב. פרויקטי חלוץ - בחינת טווח אמצעים לניהול והשבת נגר עילי ברמה הפרטית הציבורית והמוסדית ודירוגם כ-best practices המוכרים והמקובלים על הגורמים השונים תוך הגדרת סטנדרט הנדסי עם דרישות כמות ואיכות

ג. גיבוש תמריצים לתכנון וביצוע תמריצים עבור פיתוח רגיש מים כשיפוי לרשויות מקומיות המעשירות את מאגרי מי התהום הלאומיים.

ד. בחינה ובקרה הדוקה יותר לנושאי ניהול נגר ברמת הוראות לתכניות מפורטות ולאחר מכן בבקשה להיתר. עיקר עובי הנגר העירוני מקורו במבנים ולכן כדאיות מניעת הנגר ממרכיב זה.

לסיכום: נדמה שרשויות התכנון במדינת ישראל עדיין לא השכילו להפנים את האפשרות לרתום משאב מניב כמי נגר העירוני - משאב המאגד בתוכו מגוון יתרונות והזדמנויות כלכליים, חברתיים לצד תועלות סביבתיות רבות

על-מנת להתמודד עם האתגרים המרכזיים הנולדים מתהליכי העיור המואצים. המרכז לערים רגישות מים בישראל שם לו למטרה לתת מענה מדעי ויישומי לאתגרים הללו תוך בחינתם והתאמתם לתנאים ולצרכים בישראל. יחד עם זאת, על-מנת לקיים הטמעה רחבה וסדורה בערים נדרש שיתוף פעולה בן משרדי בדמות ועדת היגוי לאומית (או אחר) לנושא. צוות היגוי שכזה יאפשר לגבש רגולציה משקוללת הנותנת מענה בינתחומי לנושא ותאפשר מעבר מדורג ואחראי ליצירת ערים רגישות מים בישראל.



איור 45: הדמיית המערכת בבת-ים. עיבוד: אסף מירון

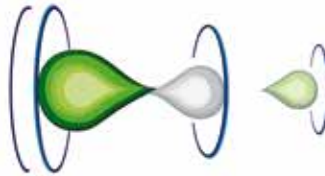
החוקרים

פרויקטים	מטרת הפרויקט	צוות מחקר אקדמי	מוסד אקדמי	תפקיד
פרויקט אב (פילר) 1 מחזור המים העירוני	פרויקט אב זה עוסק בכימות מקורות מים קיימים ועתידיים בסביבה העירונית: מי תהום, מים אפורים (דלוחין) מים שחורים (צואין), מי נגר עירוני, מים מושבים וכד'			
P1.1	חזון ערים רגישות מים (WSC) בישראל	גיבוש חזון של ערים רגישות מים בישראל	פרופ'ח ערן פרידלר, ד"ר יעל גלבוע	טכניון חוקר ראשי עמית מחקר
P1.2	אפיון מי נגר עירוני בערים ישראליות	אפיון כמותי ואיכותי של מי הנגר העירוני בערי ישראל תוך בחינת החדרתם למי תהום	פרופסור רוני וולך פרופ'ח ערן פרידלר ד"ר ירון זינגר מר עדי האפט	חוקר ראשי חוקר עמית מחקר סטודנט Ph.D
פרויקט אב (pillar) 2 תכנון ועיצוב עירוני רגיש מים	פרויקט אב זה עוסק במתן פתרונות משולבים לתכנון עירוני רגיש מים חדשני			
P2.1	חקר פתרונות תכנון עירוני עבור טכנולוגיות חדשניות רגישות מים	להבין היכן ובאיזה אופן ניתן לשלב אסטרטגיות רגישות מים במרקם העירוני להחדרת מי נגר למי תהום, ולאמור את התרומה האפשרית לאיכות החיים, ובפרט למיקרו אקלים של העיר	פרופ'ח אביתר ארל, ד"ר אביבה פיטרס ד"ר שי קפלן	חוקר ראשי עמית מחקר עמית מחקר
פרויקט אב (pillar) 3 טכנולוגיות רגישות מים	פרויקט אב זה עוסק בפיתוח טכנולוגיות מים משולבות חדשניות היכולות להיות מיושמות בנוף העירוני על-מנת לקדם מרקמים עירוניים רגשי מים			
P3.1	ביופילטרים היברידים לטיפול משולב במי-נגר עירוני ובמי-תהום מזוהמים	לפתח ולבחון ביופילטרים היברידים (רב עונתי ורב שימושי) לקציר ולטיפול של במי נגר עירוני בעונה הגשומה (בחורף) ולשיקום מי תהום מזוהמים בעונת היובש (קיץ)	פרופסור אשר ברנר ד"ר ירון זינגר אשרת קורן ד"ר סמיון שנדלוב הודיה כהן אור גרדוס, עמיר אלוני	חוקר ראשי עמית מחקר מנהלת מעבדה טכנאי סטודנטים MSc
פרויקט אב (pillar) 4 ערוצי יישום	פרויקט אב זה עוסק ביישום חידושים חברתיים-טכניים אשר יוביל לפיתוח ערים רגישות מים בישראל			
P4.1	הבנת התכנון העירוני הרגיש למים בהקשר הישראלי	הבנת התוצרים החברתיים, הטכניים, והכלכליים של תכנון עירוני רגיש מים חדשני בישראל ומיפוי של חסמים והזדמנויות של יישומים קיימים	פרופ'ח טל אלון מוזס פרופ' נעמי כרמון פרופ'מ מישל פורטמן פרופ'ח אליסה רוזנברג נרב שפירא	חוקרת ראשית חוקרת חוקרת עמית מחקר סטודנט לתואר MSc
P4.2	הדגמת טכנולוגיות רגישות מים לקציר נגר עירוני	לספק 'הוכחת היתכנות' לקציר, לטיפול ולהחדרה של מי נגר עירוני בערי ישראל	פרופ' אנה דלטיק ד"ר ירון זינגר	חוקרת ראשית עמית מחקר

גופים מסייעים



The Center for Water Sensitive Cities in Israel
 המרכז לערים רגישות
 מים בישראל



האוניברסיטה העברית בירושלים
 The Hebrew University of Jerusalem



Lee Liberman Charitable Foundation



אחדות ארגון
 בת-ים

