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 וחיידקים 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 ביופילטרציה 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 פוטניאל 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 למזהמים נוספים; 3) אפיון מי הנגר משימושי הקרקע השונים והשוואתם לתקני איכויות מים שונים.

בדומה 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 הקניות 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):

- **אגן הניקוז ראשי** המתנקז לתעלת ניקוז ראשית המהווה סכם לכל האגן, 2,785 דונם.
- **אזורי מגורים** הכוללים כבישים, מדרכות, גינות, מבנים וכו', 173 דונם.
- **אזור מסחר ותעשייה זעירה** הכוללים מוסכים, בתי מלאכה, חנויות וכו', 192 דונם.
- **כביש 55 בינעירוני** בעל תנועת רכבים ערה בכל שעות היום, 5.8 דונם.

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

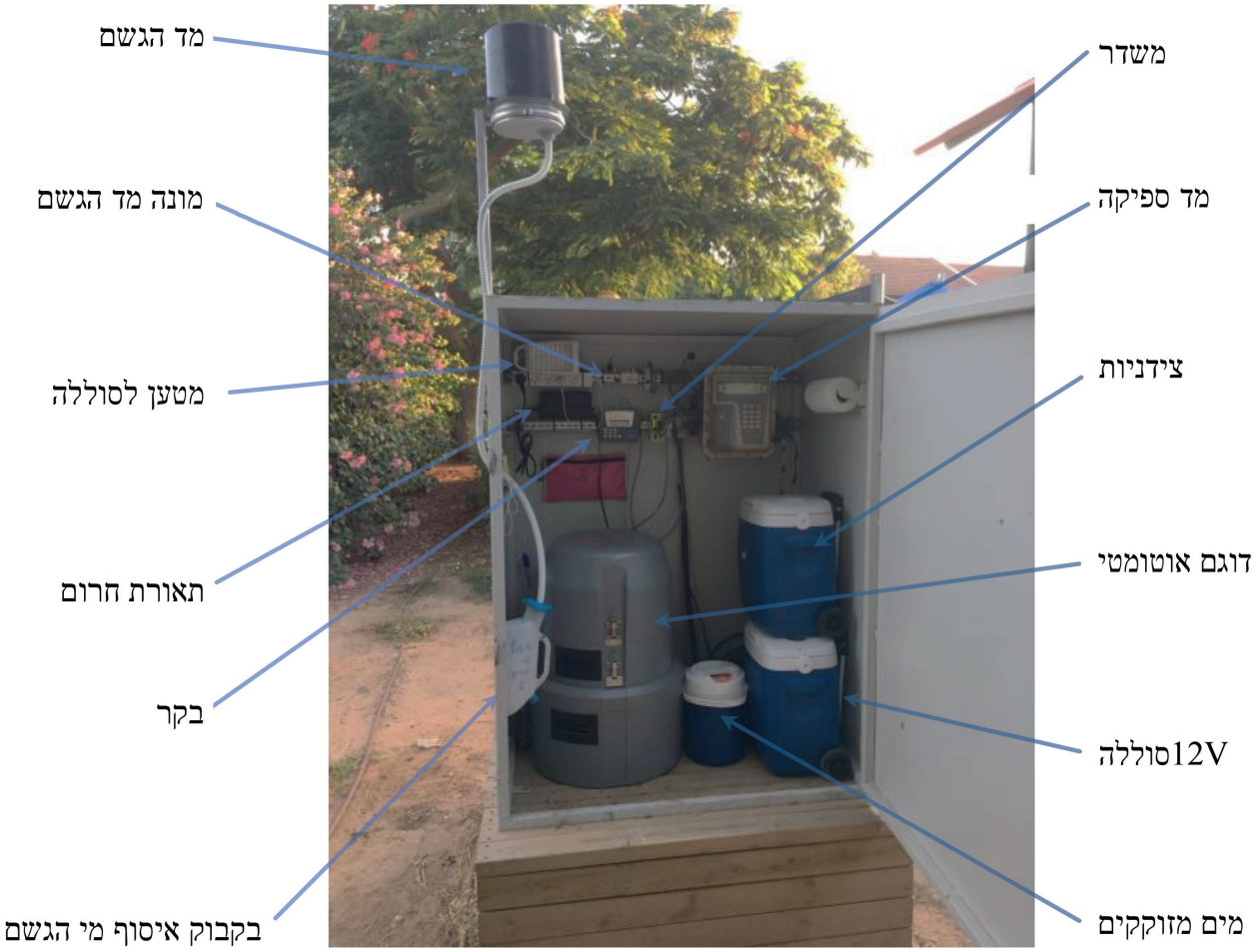
איור 7: מימין- אגן T המהווה קטע מכביש 55, במרכז- אגן R הכולל מגורים בבנייה רוויה למחצה, משמאל- אגן L הכולל תעשיה זעירה ומסחר / **צילומים: עדי האפט**

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 ששונעו 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 T 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 בועיות אוויר לתחתית הנוזל על מנת לחשב את עומק הנוזל (בעזרת חישוב ההתנגדות לשחרור הבועיות) (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, דוגמא 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 באינטרוולי 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 JazzT/M

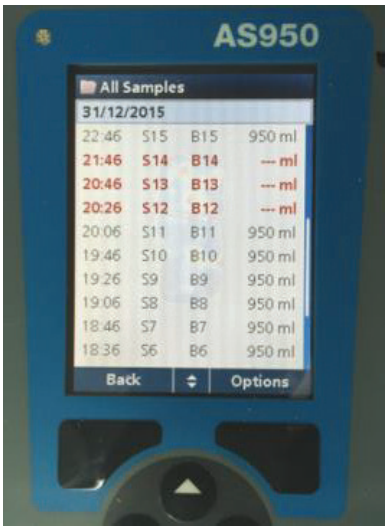
בעונה הנוכחית לאחר תוספת הבקר ותכנותו בהתאם להתנהגות תת-האגן שעליו הוא מופקד, נקבעה מדיניות איסוף דגימות בהתאם לטבלה 1. בעבור האגן כולו G מד הספיקה תוכנת לתת פולס לבקר בכל 2 מ"ק העוברים בתעלה, בעוד שבתתי-אגנים L ו-R בכל 0.5 מ"ק ואילו בתת-אגן הכביש הקטן במיוחד, בכל 0.01 מ"ק (טבלה 1). הבקר מודד את הזמן 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 דגימה 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 פריסטלטית עם זרועה חלוקה (איור 11).



איור 11: משמאל, דוגם אוטומטי מסוג SIGMA AS 950 בארון המחקר בתחנה L על שני חלקיו, הבסיס המכיל תוך של 24 בקבוקי דיגום והמכסה, הכולל את יחידת הבקרה וממשק המשתמש לרבות משאבת פריסטלטית 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 ממיכל זה לבקבוק הנאסף יחד עם 24 בקבוקי מי הנגר ומסומן כבקבוק מספר 25.

איור 13: משמאל, מיכל איסוף מי הגשם, במרכז, מתקן יעודי 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 Standard Method (SM) 2540D
2. מוליכות חשמלית (EC)
3. מתכות ויסודות: כסף (Ag), אלומניום (Al), בורון (B), בריום (Ba), סידן (Ca), קדמיום (Cd), קובולט (Co), כרום (Cr), נחושת (Cu), ברזל (Fe), גליום (Ga), כספית (Hg), אינדיום (In), אשלגן (K), ליתיום (Li), מגניזיום (Mg), מנגן (Mn), מוליבדן (Mo), נתרן (Na), ניקל (Ni), זרחן (P), עופרת (Pb), גופרית (S), אנטימון (Sb), סלניום (Se), סיליקון (Si), בדיל (Sn), סטרונציום (Sr), טיטניום (Ti), תליום (Tl), ונדיום (V), אבץ (Zn). אנליזה זו בוצעה באמצעות מכשיר ICP Radial ICP-OES מסוג Arcos מתוצרת Spectro Ltd, גרמניה.

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 סופה 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 מיצוע התוצאות של הבקבוקים שנאספו, בעונה השנייה הוכן בקבוק מיצוע (משוקלל על פי ספיקה) המייצג את ה-EMC עבור כל סופת גשם לכל אחת מהתחנות על מנת שיילקח לבדיקות 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-Vcsh מתוצרת Shimadzu, כמו גם מספר מזהמים נוספים: פלואור (F), כלוריד (Cl), ברום (Br), חנקית NO_2^-, חנקה NO_3^-, סולפט SO_4^{2-} ופוספט PO_4^{3-}.

תוצאות ודיון

לעומת חורף חורף 2015-16 בהם נדגמו 18 אירועי נגר מלאים, במהלך עונת הגשמים 2016-2017 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 2016-2017

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.

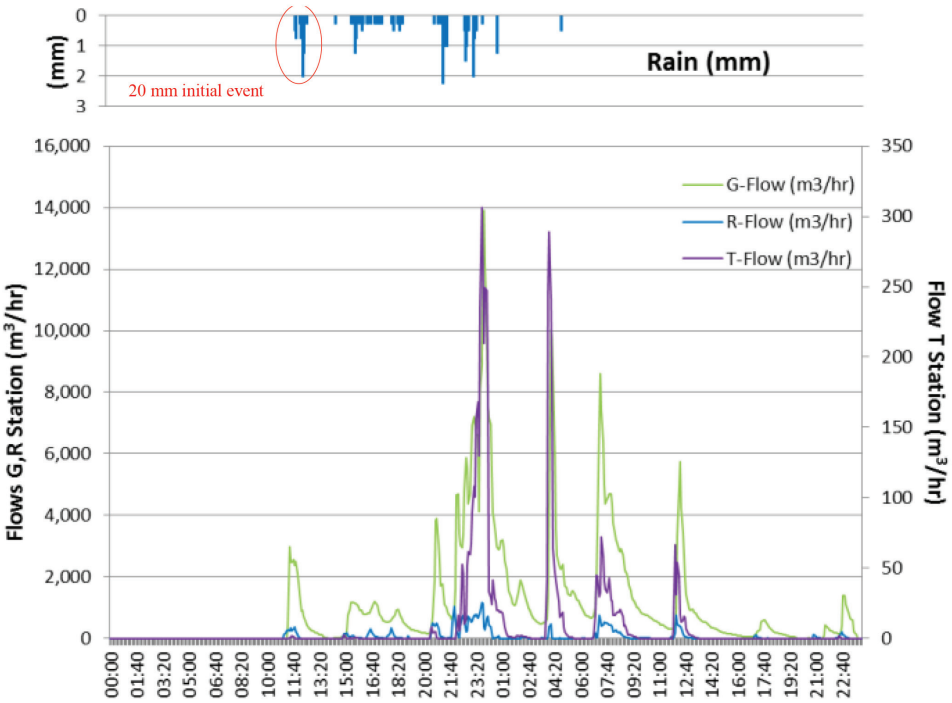
ההבדלים בנפחי הנגר העילי משני תתי האגנים נובעים כנראה מיחס השטחים הבלתי חדירים לסך שטח האגן. יש לציין שתת אגן הכביש בעונת הגשמים הראשונה הניב נפח נגר הדומה לחלקו היחסי משטח האגן, וזאת משום שהמדידות בעונת הגשמים הראשונה החלו בתחילת דצמבר ללא הכמויות הגדולות שירדו בחודשים אוקטובר ונובמבר 2015 (215 מ"מ). 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)	תעשיה 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%	* (575) 360
2016-2017	100%	15.9%	5.5%	0.4%	481

* עונת הגשמים הראשונה נמדדה מחודש דצמבר 2015 בלבד

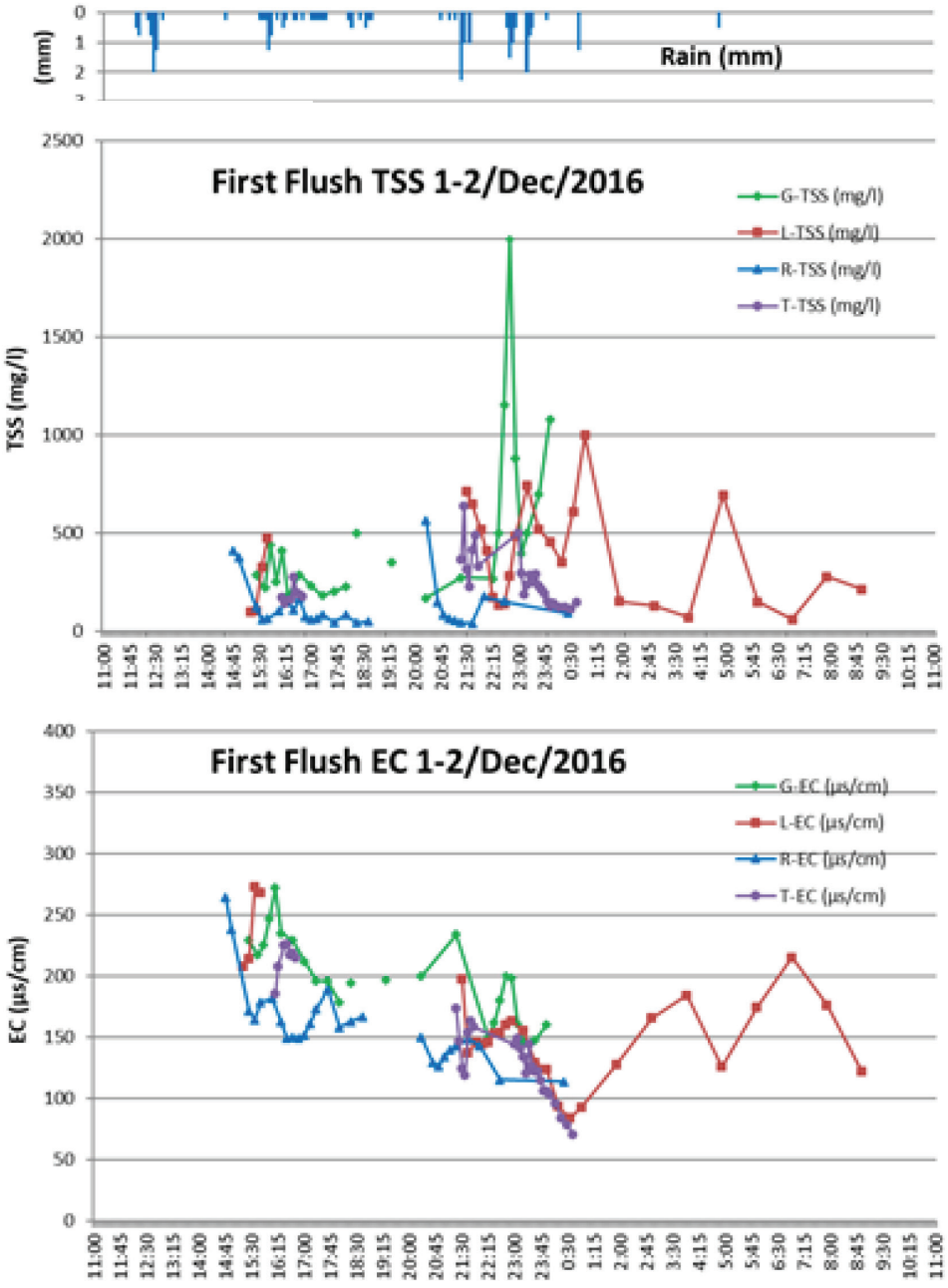
עונת הגשמים 2016-2017 החלה עם גשם ראשון מאוחר יחסית ב-1-2 לדצמבר 2016 עם 110 מ"מ גשם שהחלו עם מטח ראשון של 20 מ"מ ובעקבותיו מטח נוסף של 90 מ"מ אשר אפשרו איסוף מי נגר פעמיים במהלך יממה ומחצה זו (איור 14). המטח הראשון בן 20 מ"מ הניב נפח נגר של 8,000 מ"ק במוצא האגן הראשי (G) ורק 1.5 מ"ק של מי נגר במוצא 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 לבדוק 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.



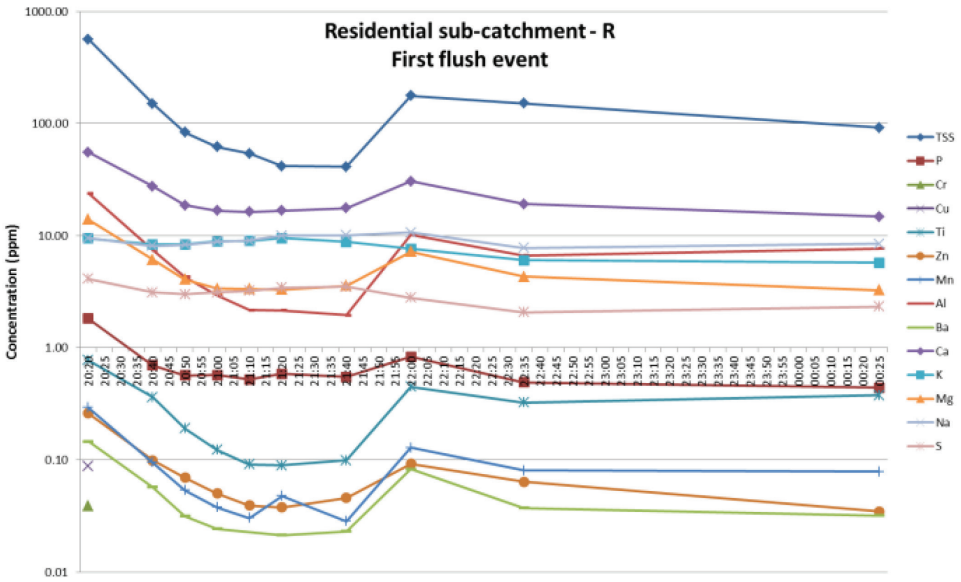
איור 15: TSS, EC פולוטוגרף של הגשם הראשון ב-1-2 לדצמבר 2016

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 מקסימאלי 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).

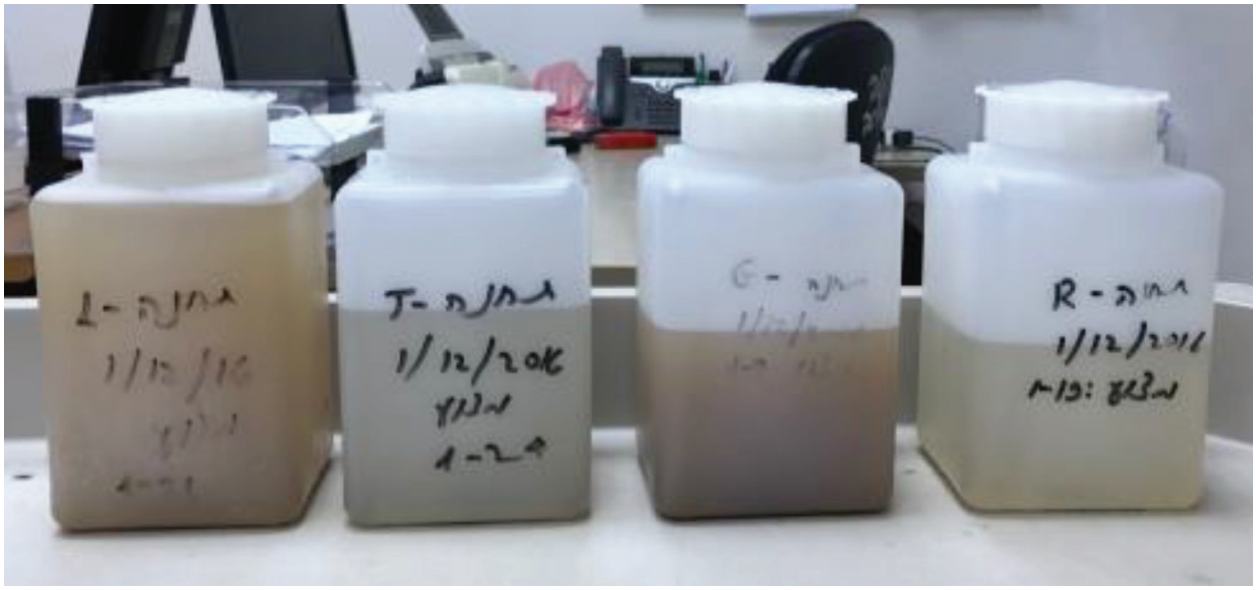
למרות שלסידן ומגנזיום אין ערכים מותרים מוגדרים למי השתייה, הם מהווים קטיונים עיקריים במי שתייה טבעיים ולכן מגדירים את קשיות המים. בעוד נוכחות סידן במי השתייה נקשרת לטעם טוב של המים, ההשפעה של מגנזיום על הטעם עדיין לא ברורה (Paltikanov 2013). ה-EPA האמריקאי עדיין לא קבע סטנדרטים של קושיות בנוכחות של סידן או מגנזיום, אבל מקובל בארה"ב שכאשר קושיות המים מגיעה לרמה של 150 מ"ג $CaCO_3$ 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-2-1 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 וסיליקה 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 בד"כ של מי הנגר בתעלת G וגם את הריכוזים של האלמנטים הנ"ל.

בדו"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 2016	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
	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
2016 2017	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
	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 התעשיה 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 לעליה בתת-אגן התעשיה הזעירה הוא השינוי שאיזור התעשיה 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 T ו-L (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

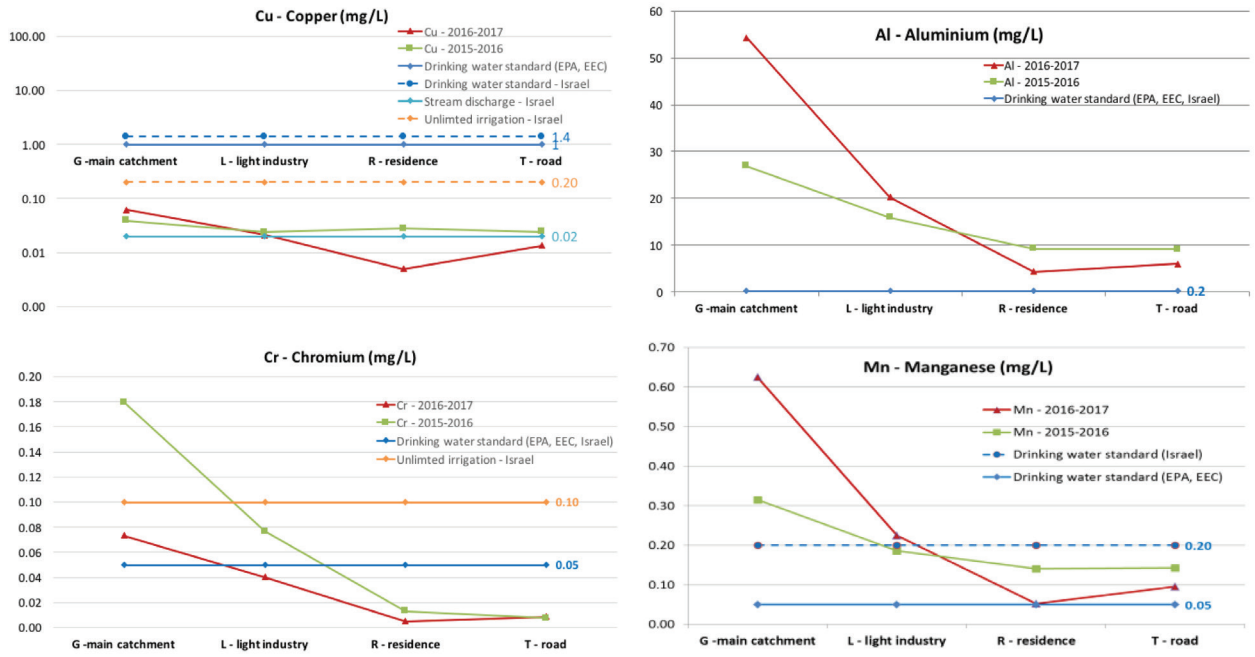
למרות הסיכון בהשוואת הממוצע העונתי EMC של המזהמים, שכן ערכים גבוהים של מזהמים נמדדים בתחילת הסופה שהולכים ויורדים במהלכה, נבצע השוואה של מספר מזהמים לתקנות הישראליות לאיכות מי השתייה, השקיה והזרמת מים לנחלים.

מיצוע (EMC) של Cu, Al, Mn, Cr מזהמים משמעותיים מארבעת האגנים עבור שתי עונות הגשמים שנמדדו נבחנו אל מול תקני המים. ריכוז האלומניום Al נמצא גבוהה בשני סדרי גודל מתקנות מי השתייה האמריקאי, האירופאי והישראלי שהיינו 0.20 מג"ל (איור 18 מימין למעלה). בלט במיוחד ריכוז האלומניום הממוצע העונתי בעונת הגשמים השנייה שהגיע לרמה של 54 מג"ל במוצא האגן הכללי G. ערכי האלומניום הנמוכים ביותר נמדדו במוצא תת-אגן המגורים בעונה השנייה 4.30 מג"ל אשר עדיין משמעותית מעל הריכוז המותר בתקנות. אלומניום 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 בתקנן 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 שבמיצוע EMC שתי העונות שנדגמו נמדדו ערכי מנגן מתת-אגן הכביש נמוכים מהמותר בתקנן הישראלי, הרי שבדקות הראשונות של הגשם הראשון בראשון 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 תת-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 ופטריות בשימושים ביתיים ובגינות ציבוריות ואף כתוסף בחומרים לציפויי גגות. 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.



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.

מהמדידות עד כה מסתמן שמי הנגר בכפר סבא מצריכים טיפול בטרם יהיה ניתן לעשות בהם שימוש כלשהו.

המשך מחקר

א. בעונת הגשמים הבאה יינתן דגש על דיגום על אנליזות להן יש חלון זמנים מוגדר עבור: TOC, TKN, NO3 E-Coli, Fecal Coliform.

ב. הרחבת האנליזות למזהמים נוספים: NO2, PO4, SO4, TKN.

ג. הרחבת האנליזות לניתוח פילוג גודל חלקיקים בכל סופות של עונת הגשם השלישית לרבות בחינת אירועים מסוימים שנדגמו בעונה השנייה.

ד. אפיון מפורט יותר של שימושי הקרקע בתתי האגנים השונים לרבות האגן הכללי וניתוח התוצאות בהתאם לאפיון זה.