



הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל
Technion – Israel Institute of Technology

ספריות הטכניון
The Technion Libraries

בית הספר ללימודי מוסמכים ע"ש ארווין וג'ואן ג'ייקובס
Irwin and Joan Jacobs Graduate School

©

All rights reserved

*This work, in whole or in part, may not be copied (in any media), printed, translated, stored in a retrieval system, transmitted via the internet or other electronic means, except for "fair use" of brief quotations for academic instruction, criticism, or research purposes only.
Commercial use of this material is completely prohibited.*

©

כל הזכויות שמורות

אין להעתיק (במדיה כלשהי), להדפיס, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, להפיץ באינטרנט, חיבור זה או כל חלק ממנו, למעט "שימוש הוגן" בקטעים קצרים מן החיבור למטרות לימוד, הוראה, ביקורת או מחקר. שימוש מסחרי בחומר הכלול בחיבור זה אסור בהחלט.

ניהול נגר בשכונת מגורים בגישת תר"מ (תכנון רגיש למים)

השוואת חלופות בגבעת זמר בכרמל

חיבור על מחקר

לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת התואר

מגיסטר למדעים במדעי איכות הסביבה

שי שלו

הוגש לסנט הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

אפריל 2011

חיפה

חשוון תשע"א

המחקר נעשה בהנחיית פרופ' אורי שמיר ופרופ' נעמי כרמון בפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית
אני מודה לטכניון על התמיכה הכספית הנדיבה בהשתלמותי.

תודתי הרבה לפרופסור אורי שמיר ופרופסור נעמי כרמון, על ההזדמנות שנתנו לי, על השיעורים,
התובנות וההכוונה הרבה אשר בלעדיהם הפרי לא היה מבשיל.

תוכן עניינים

1	.....	תקציר	
3	.....	מבוא	1
3	.....	הרקע למחקר	1.1
3	.....	מטרות העבודה ושלביה	1.2
5	.....	מבנה העבודה	1.3
6	.....	רקע מקצועי וסקר ספרות	2
6	.....	נגר על-קרקעי - תאור היווצרותו באגן היקוות	2.1
7	.....	השפעות פיתוח על ההידרולוגיה	2.2
10	.....	כמות מים – נפחים וספיקות	2.2.1
12	.....	איכות הנגר העירוני	2.2.2
16	.....	תכנון רגיש למים – תר"מ	2.3
17	.....	אמצעים ליישום מטרות תר"מ	2.3.1
25	.....	מחקרים וגישות דומות בעולם	2.3.2
30	.....	שכונת זמר – מקרה בוחן	3
30	.....	האתר הנבחר – שכונה בעיר חיפה	3.1
30	.....	מאפייני אזור המחקר	3.1.1
38	.....	תוכנית פיתוח מאושרת	3.2
40	.....	נזקים פוטנציאליים כתוצאה מפיתוח שכונה, באגן ובמורדו	3.3
43	.....	חלופות תכנון אפשריות בגבעת זמר	3.4
44	.....	נוהל המחקר וכליו	4
44	.....	בחירת המשתנים המתארים את ההתנהגות ההידרולוגית של האגן והכלים לחישובם	4.1
45	.....	מערכות מידע גיאוגרפיות – מ"ג	4.2
46	.....	יישום מ"ג בשכונת זמר	4.2.1
47	.....	מודלים לחישוב נפחי נגר	4.3
48	.....	מודל SCS	4.3.1

תוכן עניינים (המשך)

52	מודל SCS-מבוזר: שילוב מודל SCS עם מערכת מידע גיאוגרפי	4.3.2
56	בחינת מודל SCS-מבוזר על מערכים פשוטים של מגרשים	4.3.3
62	מודל לחישוב ספיקת שיא – השיטה הרציונלית	4.4
66	יצירת הידרוגרמה המייצגת את תגובת אגן לאירוע גשם נתון	4.4.1
71	יישום בגבעת זמר: תכנון קיים ותכנון חלופי	5
71	חלופות תכנון	5.1
79	בחירת מתקנים לניהול נגר	5.2
82	חישוב נפחי הנגר	5.2.1
86	נפחי נגר במוצא השכונה	5.2.2
89	ספיקות שיא ומתקנים למיתון ספיקות	5.2.3
96	סיכום ומסקנות	6
96	מבוא	6.1
96	מטרות המחקר ומימושן בעבודה הנוכחית	6.2
98	סיכום הממצאים החישוביים	6.3
98	ספיקות שיא במוצא השכונה	6.3.1
98	נפחי נגר במוצא השכונה	6.3.2
100	דיון בתועלות המופקות מתכנון השכונה הנבחרת על-פי עקרונות תר"מ לניהול נגר	6.4
101	מסקנות כלליות לגבי ניהול נגר עירוני	6.5
102	המלצות לאיסוף נתונים ומחקר בעבור שיפור החישובים הדרושים לניהול נגר עירוני על-פי עקרונות תכנון רגיש למים	6.6
104	מקורות	7

רשימת איורים

10	איור 1 - הידרוגרמה של אגן בלתי מפותח ואגן מפותח
18	איור 2 - רצועות צמחייה

19.....	איור 3 - מתקני אגירה/השהייה תת קרקעים
20.....	איור 4 - גגות ירוקים
21.....	איור 5 - בור החדרה ותא סינון תשטפי כביש
22.....	איור 6 - קופסת "עצי פילטר"
22.....	איור 7 - משטחים חדירים
31.....	איור 8 - מיקום גבעת זמר
34.....	איור 9 - תאי אקוויפר הכרמל
36.....	איור 10 - אגן נחל גיבורים
39.....	איור 11 - תוכנית הפיתוח המאושרת
55.....	איור 12 - דוגמה למהלך הזרימה והחישוב במודל SCS מבוזר
56.....	איור 13 - מתארים אפשריים עבור מערך מספר 1
57.....	איור 14 - עובי נגר כנגד עובי גשם עבור שני סידורים מרחביים של שטח חדיר ואטום
58.....	איור 15 - מערך מס' 2
59.....	איור 16 - מערך מס' 3 - מדמה שכונה
64.....	איור 17 - עוצמה-משך-הסתברות, הנתונים נלקחו מתחנת מדידה באזור נמל חיפה
67.....	איור 18 - הידרוגרמת יחידה
67.....	איור 19 - התאמת ספיקת השיא של הידרוגרמת היחידה לאירוע הגשם
70.....	איור 20 - דוגמה לבניית הידרוגרמה על ידי סכימת מספר הידרוגרמות
73.....	איור 21 - חלופה 1, תוכנית מאושרת לפיתוח בגבעת זמר
74.....	איור 22 - חלופה 2, תוכנית מוצעת לפיתוח בגבעת זמר
75.....	איור 23 - השוואת התכנית המקורית והתכנית המוצעת
82.....	איור 24 - רשת הזרימה בתוכנית המאושרת (חלופות 1 ו-1א)
83.....	איור 25 - רשת הזרימה בתוכנית המוצעת (חלופות 2 ו-2א)
85.....	איור 26 - נפח הנגר במוצא השכונה בארבע חלופות התכנון עבור סופות עד 100 מ"מ
87.....	איור 27 - נפח הנגר במוצא השכונה בארבע חלופות התכנון עבור סופות עד 60 מ"מ
89.....	איור 28 - שכיחויות עובי גשם בסופות נמדדות עבור השנים 2001/2 ו-2003/4
	איור 29 - מציאת עוצמות הגשם המתאימות לזמני הריכוז בשתי תכניות הפיתוח עבור חישוב באמצעות השיטה הרציונלית
91.....	

- איור 30 - - הידורגרמות עבור חלופה 1 וחלופה 2 92
- איור 31 - השוואת הידורגרמות בין מצב לא פותח לבין שתי החלופות לצורך קביעת נפח מתקן אגירה.. 93
- איור 32 - סכמת פעולת מתקן השהיה 93
- איור 33 - ספיקת כניסה ויציאת מים מהמתקן השהייה 95

רשימת טבלאות

- טבלה 1- תועלות עיקריות ממתקני תר"מ 24
- טבלה 2 - סוגי צמחיה נפוצים בגבעת זמר 32
- טבלה 3 - נתוני מילוי ושאיבות מתאי האקוויפרים 34
- טבלה 4 - שימושי הקרקע בתכנית המאושרת 40
- טבלה 5 - מוליכות הידרולית של קרקעות ברוויה 49
- טבלה 6 - השוואת נפחי נגר עבור רשת הזרימה המוצגת באיור 12 54
- טבלה 7 - קבלה, החזרה ויציאת נגר בפולינום במערך טורי, עבור גשם 50 מ"מ 59
- טבלה 8 - השוואת נפחים בין שיטות חישוב שונות לשימושי קרקע באיור 16 60
- טבלה 9 - מקדמי נגר 65
- טבלה 10 - בניית הידורגרמה מסכום הידורגרמות מייצגות 70
- טבלה 11 - השוואת שימושי הקרקע בין התכנון המקורי (חלופה 1) לתכנון המוצע (חלופה 2) 76
- טבלה 12 - ערכי CN_c שיושמו עבור המגרשים השונים 79
- טבלה 13 - קביעת ערכי מקדם CN_c לשימושי הקרקע השונים 81
- טבלה 14 - אחוזי השטחים של שימושי הקרקע בשכונה, מקדמי CN ומקדם משוקלל לשכונה, עבור התכנית המאושרת (חלופות 1 ו-1א) והתכנית המוצעת (2 ו-2א) בלי ועם מתקנים לניהול הנגר 84
- טבלה 15 - עובי גשם יומי מרבי בחודש, תחנת המדידה בנמל חיפה 85
- טבלה 16 - נפח שנתי מצטבר של גשם ונגר במשך 3 שנים עבור ארבע החלופות 88
- טבלה 17 - זמן ריכוז במצב הטבעי ועבור שתי תכניות הפיתוח לתקופת חזרה שונות, 10,5 ו-3 שנים וספיקת השיא עבור תקופת חזרה של 5 שנים 90

רשימת תמונות

- תמונה 1 - חתך הקרקע במחשוף הצפוני בגבעת זמר 32
- תמונה 2 - כביש מוצף בסמוך לגשר פז בתאריך 37
- תמונה 3 - נזקים בנחל גיבורים כתוצאה מספיקות החורגות את הספיקה המתוכננת 42

מילון מונחים

אגן ניקוז – שטח שכל טיפות המים שנופלות בו מתנקזות כולן לנקודה אחת, נקודה זו מהווה את נקודת מוצא האגן.

אוגר – נפח המים הנאגר להשהיה ואגירה זמנית במתחם/מתקן מסוים.

זמן ריכוז – משך הזמן הארוך ביותר שלוקח לטיפת מים הנופלת בגבולות האגן להגיע אל נקודת מוצא האגן. נחשב לתכונה של האגן עצמו, למרות שידוע שזמן הריכוז משתנה בהשפעת עוצמת הגשם.

הידרוגרף – ספיקת הנגר במוצא האגן כתלות בזמן מתחילת סופת גשם, מבוטא כגרף או טבלת ערכים על פני זמן.

חידור – מעבר מי נגר מפני הקרקע לתוכה.

מאזן הידרולוגי – סכום כמויות המים הנכנסות לאגן פחות סכום כמויות המים היוצאות ממנו בדרכים שונות במשך תקופת זמן נתונה נותן את הכמות שנאגרה בשטח הנדון (אגן) במשך זמן זה.

מקדם נפח הנגר – היחס בין נפח הנגר המתהווה במהלך סופה לבין נפח הגשם שירד באותה סופה.

מקדם ספיקת השיא – פרמטר המציג את אופי וצפיפות הפיתוח. מתוך מכפלתו בשטח האגן ועוצמת הגשם לתכנון (הנבחרת על פי תקופת החזרה שנבחרה) מחושבת ספיקת השיא בסופה הנדונה על פי השיטה הרצינונית (ראה סעיף 4.4).

נגר – אותו חלק מן הגשם שנופל על הקרקע, אינו מתאדה, אינו נלכד על ידי הצומח ואינו מחלחל בקרקע, אלא זורם ומתנקז על פני הקרקע.

סופת גשם - (אירוע גשם) משך הזמן בו יורד ברציפות גשם. סופת גשם מאופיינת על ידי משך (זמן) עובי (כמות כוללת) ועוצמות (כמויות ליחידת זמן).

סופת תכן – סופה המשמשת תכנון מערכות ניקוז. נבחרת על פי תקופת החזרה הנבחרת לתכנון.

ספיקה – נפח מים העובר בחתך מסוים ביחידת זמן.

ספיקת שיא – ספיקת נגר מרבית של סופת התכן. משמשת בתכנון מערכות ניקוז.

עובי גשם – נפח הגשם (של סופה או חלק ממנה) על פני האגן, מבוטא ביחידות של עובי (לרוב מ"מ) המיוחס לכל שטח האגן.

שצ"פ – שטח ציבורי פתוח.

תקופת חזרה – תדירות התרחשות סופה בעוצמה מסוימת.

מודל SCS – מודל לחישוב נפח הנגר הסופתי שפותח ע"י השרות לשימור הקרקע בארה"ב (US Soil Conservation Service)

מודל DSCS – מודל SCS מבוזר (Distributed) שפותח בעבודה זו (סעיף 4.3.2)

תקציר

פיתוח ובנייה בשטחים טבעיים מקטינים את כמות המים המחלחלים ומעשירים את האקוויפרים, מורידים את איכותם, מגדילים את נפח וספיקות הנגר, מעלים את ההסתברות לסחף קרקע ולהצפות במורד ופוגעים בנישות אקולוגיות הניזונות מנגר מן המעלה. תר"מ (תכנון רגיש למים) אינו מכוון למניעת פיתוח ובנייה אלא שואף למתן את השפעותיהם השליליות וליצור תועלות מניהול מושכל של נגר.

בטכניון נערכה סדרת עבודות בנושא ניהול נגר וניקוז בגישת תר"מ. אלו התמקדו במישור החוף, באזורים הנמצאים במורד אגני הנחלים הזורמים לים התיכון ומעל אקוויפר החוף. המחקר הנוכחי עוסק בשכונה הנמצאת במעלה אגן – גבעת זמר שבכרמל – שבה התועלת מהחדרת המים אינה ברורה, ונפחי וספיקות הנגר היוצאים מן השכונה בעלי פוטנציאל לנזק במורד, ולכן ניהול הנגר והניקוז בשכונה מכוון להקטנת ההשפעות השליליות ע"י מיתון נפחים וספיקות במוצאה ולהפקת תועלות משימוש בנגר בשכונה.

מטרת המחקר הייתה לבחון את התועלות הפוטנציאליות הטמונות ביישום עקרונות ואמצעי תר"מ לניהול הנגר בשכונת מגורים מתוכננת בחיפה, באזור תלול וקרקע סלעית-גירית. המחקר בחן השפעה של הפיתוח המתוכנן בשכונה הנבחרת על נפחי נגר וספיקות שיא של נגר, על-פי מספר חלופות תכנון, הראשונה קרובה לקונבנציונלית ושלוש האחרות בנויות על-פי עקרונות תר"מיים וכוללות אמצעים תר"מיים לניהול נגר: (1) תוכנית פיתוח שנתקבלה מעיריית חיפה, (א1) תכנון זה, בתוספת מתקנים לניהול הנגר, (2) חלופה מוצעת, המבוססת על מיקום מרחבי שונה של שימושי הקרקע, בו שימושי הקרקע בעלי פוטנציאל נמוך להחדרת הנגר מוקמו במעלה ושטחים חדירים במורד, (א2) אותה חלופה מוצעת, בתוספת מתקנים לניהול הנגר.

לכל חלופה חושבו ההשפעות ההידרולוגיות על (א) ספיקת השיא המשמשת לתכנון מערכת הנקזים במוצא השכונה באמצעות השיטה הרציונאלית, ו- (ב) נפחי הנגר הסופתי - באמצעות מודל SCS מבוזר, לסופות בעובי שונה ולאוכלוסיית סופות מדודות במשך שלוש שנים. מודל SCS המבוזר, שפותח בעבודה זו, מהווה הרחבה של מודל SCS המקובל, כך שהוא נותן ביטוי למיקום התכסיות ופריסת שימושי הקרקע השונים באגן.

שתי מסקנות תכנוניות עיקריות עלו מניתוח הממצאים לגבי ניהול נגר בגישת תר"מ בשכונה:

(א) לגבי נפחי נגר - תכנון המבוסס על עקרון הצבת השטחים החדירים במורדו של האזור המפותח יוצר פחות נפח נגר במוצא השכונה מאשר תכנון המגדיל את כושר החידור של תכסיות הקרקע, כפי שהיה המקורית בתכנון המקורי. נמצא כי חלופות המבוססות על עקרון זה (חלופות

2 ו-2א) יצרו נפח נגר שנתי מצטבר בשיעור של 20% ו-50%, בהתאמה, יחסית לנפחים של חלופה 1, ואילו חלופה 1א יצרה 60% מן הנפח של חלופה 1.

(ב) לגבי ספיקות שיא של נגר - שינויים במיקום שימושי הקרקע ותוספות מתקני השהייה ואגירה בגודל סביר במוצא הניקוז השכונתי יכולים להקטין במידה ניכרת את ספיקות השיא היוצאות ממוצא השכונה למורד האגן עד לערך שהיה לפני הפיתוח.

מן מהמחקר עלו גם מספר מסקנות, לגבי המודלים והנתונים הדרושים להם:

- מודל SCS אינו יכול לאמוד את השפעת הפיזור המרחבי של שימושי הקרקע השונים, בעוד מודל SCS מבוזר לוקח זאת בחשבון ולכן מומלץ להשתמש בו במהלך בחירה בין חלופות.
- קיים בארץ חסר נתונים רציפים של סופות וכמויות גשם יממתיות, בצפיפות נאותה של תחנות מדידה, הדרושים לחישובים הידרולוגיים כבסיס לתכנון.
- חסרים עקומי עצמה-משך-הסתברות הדרושים לחישוב ספיקות נגר.
- מיעוט נתוני חדירות של קרקעות, של שימושי קרקע, ושל תכסיות.

לכן, מומלצים כיווני העבודה והמחקר הבאים:

1. פעולה לריכוז מערכי נתוני גשם לסופות או לפחות ליממות וניתוחם לצרכי הפעלת מודלים.
2. התאמת מודל SCS לתנאי הארץ: כיוול מקדמי CN לתנאי הקרקע, צמחיה, ותכסיות בארץ.
3. המשך בחינת השימוש במודל SCS מבוזר וכדאיות שימושו בהשוואה למודל SCS המקובל.
4. בחינה נמשכת של השפעות מחושבות של מתקנים ופעולות לניהול נגר (כגון: גגות ירוקים, מתקני השהייה והחדרה בתוך אגנים עירוניים ובמוצאם, הקפת מגרשים בחומה) על נפחי הנגר השנתיים ועל ספיקות במוצא מן השטח, ובחינה השוואתית של השפעות תכנון קונבנציונלי ותכנון תר"מי על איכות הנגר בתנאים הידרוגרפיים שונים ובסביבות בניות שונות
5. פרויקטי חלוץ עם ניטור לבדיקה נמשכת בשטח של השפעת אמצעים תר"מיים על נפחים, ספיקות ואיכות הנגר, שיספקו בסיס לתכנון תר"מי לאזורים שונים בארץ.

1 מבוא

1.1 הרקע למחקר

המחסור במים ראויים לשתייה הינו בעיה כלל עולמית. חקלאות אינטנסיבית, עיור מתגבר, גידול אוכלוסין והעלייה ברמת החיים יוצרים ביקוש הולך וגובר של מים ראויים לשתייה, לחקלאות ולתעשייה. בארץ קיימת מגמה דומה, של גידול בצריכתם של המגזרים השונים לעומת מקורות טבעיים בלי כושר מוגבל המנוצלים ביתר ונמצאים בסכנת זיהום. אחת מן ההשפעות על מאזן הכמות והאיכות של מקורות המים ועל זרימות הנגר העל-קרקעי הוא פיתוח הממיר שטחים טבעיים לשטחים בנויים. תוצאת הפיתוח במתכונתו המקובלת היא הקטנת אחוז הגשם המחלחל ומעשיר את מי התהום, עלייה בנפחי וספיקות הנגר, ופגיעה באיכות מי הנגר כאשר הוא זורם, בשל נוכחות מזהמים שונים בשטחים מפותחים. נזקי סחף והצפות גדלים כאשר מהירות זרימת הנגר גדלה ומסלולי הזרימה משתנים כתוצאה מהסרת מכשולים מעכבי זרימה, כגון צמחיה וטופוגרפיה טבעית, והחלפתם בטופוגרפיה חלקה יותר והומוגנית, דוגמת שטחים בנויים וסלולים.

תכנון רגיש למים (תר"מ), בחלק המתייחס לניהול הנגר וניקוז) הינו גישה חלופית לתכנון השטח הבנוי, המכוון להפיק תועלות מן הנגר ולמתן את השפעותיו השליליות. התועלות אשר תר"מ שואף אליהן בין היתר הינן שימור וניצול יעיל של משאב המים והוספת מקורות מים נוספים, צמצום נזקי הצפות במורד ותדירותם, שיפור ושימור נוף ירוק ונישות אקולוגיות, הקטנת עלויות מערכת הניקוז והעלאת מודעות בקרב הציבור על נושאים אקולוגיים בכלל ושימור מים בפרט.

עבודה זו הינה המשך לסדרת עבודות שנערכו בטכניון מאז 1994 בנושא תכנון רגיש למים (תר"מ), אשר התמקדו בשילוב שיקולי מים בתכנון המרחבי ברמות השונות, ובמיוחד בניהול הנגר העילי (ובנוסף גם בחיסכון, שימוש יעיל במים, שימוש במים ממקורות לא-קונבנציונליים). עבודות קודמות עסקו בהשפעות הפיתוח על נפחי, ספיקות ואיכויות הנגר, בדרכים לכימותם ובהצעת אמצעים שונים לצמצום השפעות שליליות, כאשר כל העבודות הללו התמקדו באזור מישור החוף. העבודה הנוכחית בחנה את האפשרויות לניהול נגר וניקוז בשכונה עירונית מתוכננת על הכרמל, על פי העקרונות של תכנון רגיש למים (תר"מ), בהתאם לתנאים השוררים באזור זה, השונה מאלו שבמישור החוף.

1.2 מטרות העבודה ושלביה

העבודות הקודמות בנושא ניהול נגר וניקוז התמקדו במישור החוף, באזורים הנמצאים במורד אגני הנחלים הזורמים לים ומעל אקוויפר החוף, במגמה להשתמש בנגר בתחומי האגן, לשימוש ישיר ו/או להחדרת מי הנגר לאקוויפר. המחקר הנוכחי עוסק בשכונה הנמצאת במעלה האגן – גבעת זמר שבכרמל

– שבה התועלת מהחדרת המים אינה ברורה, ונפחי וספיקות הנגר היוצאים מן השכונה בעלי פוטנציאל לנזק במורד, ולכן ניהול הנגר והניקוז בשכונה מכוון בעיקר להקטנת ההשפעות השליליות ע"י מיתון נפחים וספיקות במוצאה ולהפיק תועלות משימוש בנגר בשכונה.

המטרה המרכזית של המחקר הינה "לבחון את יישום עקרונות ואמצעי תר"מ לניהול הנגר בשכונת מגורים מתוכננת בחיפה, באזור המאופיין בטופוגרפיה תלולה וקרקע סלעית-גירית".

ממטרה כללית זו נגזרו מטרת משנה ופותחו גישות למימושן, כלהלן:

1. לימוד והבנה, בעזרת הספרות המקצועית, מהם השינויים ההידרולוגיים והסביבתיים הצפויים, עקב בנייה של שכונה חדשה בכרמל, על פי תוכנית קונבנציונלית של בנייה וניקוז.
2. הצעת תכניות חלופיות (לעומת התכנית המקורית) של מערך שימושי הקרקע ושימוש במתקנים לניהול הנגר בשכונה, על פי גישת תר"מ.
3. בחירת והתאמת כלי חישוב, אשר יביאו לידי ביטוי בצורה הטובה ביותר את השפעות הפיתוח של כל תוכנית ויתנו בידי המתכנן תוצאות הידרולוגיות מחושבות המאפשרות לקבל החלטות על חלופות תכנון שונות.
4. חישוב ההשפעות ההידרולוגיות (נפחים וספיקות), של חלופת בסיס שתוכננה בדרך קונבנציונלית ושל חלופות מוצעות.
5. דיון בתועלות המופקות מתכניות שעוצבו על פי עקרונות תר"מ והסקת מסקנות.

העבודה כללה את השלבים הבאים:

1. לימוד עבודות קודמות שנעשו בטכניון, במקומות אחרים בארץ ובעולם, והסקת מסקנות על המטרות והאמצעים הרלבנטיים לניהול הנגר בשכונת המגורים המתוכננת על הכרמל בחיפה שנבחרה למחקר.
2. גיבוש המטרות של ניהול הנגר בשטחים בנויים בכלל, וזיהוי המטרות הרלבנטיות לאזור של שכונת המגורים הנבחרת בחיפה בפרט.
3. בחינת השפעת פיתוח קונבנציונלי של השכונה על הנגר וזיהוי הנזקים הפוטנציאליים וההשפעות על המטרות עקב השינויים האלה בנגר.
4. בחירה והתאמה של כלים חישוביים לחישוב השפעות הידרולוגיות של הפיתוח, באופן שיאפשר השוואה של השפעתן של חלופות תכנוניות, מוצעות שמטרתן צמצום נזקי הפיתוח והגדלת התועלות.
5. יצירת חלופות פיתוח בהתאם לעקרונות תר"מ.

6. חישוב ההתנהגות ההידרולוגית של החלופות שהוצבו, תוך השוואה לזו של התכנית המקורית.

7. בחינת התוצאות והסקת מסקנות.

1.3 מבנה העבודה

פרקי העבודה הינם:

פרק 2 - סקר ספרות

בפרק זה סוכם הידע הרלוונטי אשר הצטבר במהלך העבודה, עבודות העוסקות בהשפעות הישירות של פיתוח על משאב המים והשפעותיו העקיפות הבאות לידי ביטוי כלכלי ואקולוגי, גישת תר"מ וגישות דומות לה בעולם, ניהול משאב הנגר באגנים מפותחים והמתקנים והכלים התכנוניים המשמשים לכך.

פרק 3- שכונת זמר – מקרה בוחן

פרק זה מתאר את אתר המחקר, הסיבות לבחירתו, תאור תנאיו הגיאוגרפיים, ההידרולוגיים, הצמחייה הקיימת בו ומשטר הניקוז באתר ובאגן ההיקוות בו הוא ממוקם. מוצגת תוכנית פיתוח המיועדת לאתר, מנותחת השפעתה והנזקים האפשריים של יישומה ונבחנים תועלות וצמצום נזקים אפשריים אשר אליהם ניתן לשאוף על ידי שילוב שיקולי ניהול נגר בתוכנית הפיתוח, לאחר מכן מוצגות חלופות פיתוח אשר יובילו לתועלות אלו.

פרק 4 - נוהל המחקר וכליו

עוסק במשתנים הנבחרים לתיאור ההשפעות ההידרולוגיות של הפיתוח ובכלים אשר נעשה בהם שימוש על מנת לכמת השפעות אלו.

פרק 5 - יישום בגבעת זמר: תכנון קיים ותכנון חלופי

בו מתוארות חלופות התכנון והיישום בהן של הכלים התיאוריים והחישוביים אשר נידונו בפרק 4 ומוצגות תוצאות החישוב עבור כל חלופה.

פרק 6 – סיכום ומסקנות

סיכום תוצאות החישוב והשוואת החלופות השונות על פי מטרות המחקר, דיון ביעילות שיטות החישוב והכלים בהם נעשה שימוש במחקר והצעת נושאי מחקר עתידיים בעלי תרומה לנושא ניהול הנגר וניקוז.

2 רקע מקצועי וסקר ספרות

פרק זה סוקר את הרקע והידע על תכונותיו ההידרולוגיות של אגן היקוות תוך שימת דגש על רכיב הנגר העל-קרקעי (להלן: הנגר), אפיון כמות ואיכות הנגר באגן כתוצאה מאירועי גשם, וכיצד הם מושפעים משינוי תכסית הקרקע עקב פיתוח. מובאים מחקרים רלוונטיים מן הארץ והעולם, העוסקים בתכונות כמות ואיכות המים האופייניים לנגר עירוני והשפעתם על הסובב באגן ובמורדו.

2.1 נגר על-קרקעי - תאור היווצרותו באגן היקוות

אגן היקוות הוא שטח המתנקז לנקודה אחת, הנקראת מוצא האגן. למעשה, בחירת המוצא היא המגדירה את האגן, במעלה ממנה. בתוך אגן היקוות גדול ניתן לזהות אגני משנה, כל אחד מוגדר באמצעות בחירת נקודת המוצא שלו.

נגר על-קרקעי הינו אותו החלק של המשקעים היורדים באגן הזורם על פני הקרקע באגן ומגיע למוצאו, אותו חלק אשר אינו מתאדה, מחלחל לקרקע או מצטבר ונעצר באגן. הקשר בין גורמים אלו לנפח וספיקות הנגר במוצא האגן יוסבר בהמשך. מי הנגר זורמים בצורה גרביטציונית על פני השטח, מצטברים לערוצים טבעיים או מלאכותיים, אשר לאורך נתיב הזרימה מתנקזים לערוצים ראשיים יותר בהם הספיקות גדלות. בסופו של דבר מתנקזים מי הנגר לנקודה אחת, שהיא מוצא האגן; הנפחים והספיקות היוצאים מהאגן מיוחסים לנקודה זו.

באגני היקוות טבעיים תוואי הזרימה נקבעים על ידי הטופוגרפיה, הגאיות והערוצים. באזורים מפותחים, כולל עירוניים, נשלטים תוואי הזרימה גם על ידי עיצוב פני הקרקע, הערוצים והמכשולים שמציב הפיתוח, ועל ידי אלמנטים בנויים כגון כבישים, צנרת ניקוז ומאגרים.

מהירות זרימת הנגר תלויה במספר גורמים, מטאורולוגיים וטופוגרפיים. ככל שגדלים נפחי הנגר כתוצאה מעוצמת הגשם כך גם גדלה מהירות הזרימה. גורמים נוספים המשפיעים על מהירות הזרימה הינם שיפועי הקרקע. ככל שאלו גדולים יותר, עולה מהירות הזרימה. כמו כן, מהירות הזרימה מושפעת מתכסית הקרקע. זו קטנה ככל שהתכסית מחוספסת יותר. בנוסף, קיומם של מכשולים כגון צמחייה ואבנים תורם אף הוא להאטת הזרימה (Linsley et al. 1949).

"סופת גשם" או "סופה" נמשכת מתחילת הגשם עד סופו. נהוג לקחת את משך הסופה מרגע שעוצמת הגשם עולה מעל סף מסוים (למשל: 1 מ"מ לשעה) וכל עוד אין העוצמה יורדת בחזרה מתחת לסף זה. כאשר מדידת הגשם נעשית באמצעות מכשיר רושם ניתן לאתר את תחילת הסופה ואת סופה. רבים ממכשירי רישום הגשם הם ידניים, ונקראים אחת ליממה, לרוב בשעה 8:00 בבקר. אי לכך רבים מנתוני המשקעים ניתנים ליממה: סה"כ כמות הגשם ליממה, עוצמה ממוצעת ליממה.

"עוצמת הגשם" היא כמות הגשם ליחידת זמן, למשל לשעה או ליממה. חישובים הידרולוגיים, במיוחד עבור שטחים בנויים, דורשים עוצמות גשם לפרקי זמן קצרים יותר, עד כדי 5 דקות, שכן תגובת אגנים בנויים מהירה. בלית ברירה, כאשר אין נתונים לפרקי זמן קצרים כאלה, נאלצים להשתמש בנתונים יומיים, והעוצמות המחושבות הן לכן ממוצעות ליממה, ומחמיצות את המהלך האמיתי של עוצמות הגשם במהלך הסופה.

היחס בין נפח הנגר המתהווה כתוצאה מסופה לבין נפח הגשם שירד באותה סופה הוא "מקדם נפח הנגר" לסופה זו. מקדם זה גם מחושב עבור עונת גשמים של שנה שלימה, והוא אז "מקדם נפח הנגר השנתי".

ספיקת הנגר במוצא האגן משתנה במהלך סופת הגשם ואחריה, הספיקה עולה עד לערך מרבי, הנקרא "ספיקת השיא של הסופה", ויורדת לאחר מכן עד שהאגן "מתרוקן". הגרף המתאר את השתנות הספיקה על פני הזמן נקרא הידרוגרמה. קיימות שיטות רבות לאמידת ספיקת השיא של הסופה (שיא ההידרוגרמה), ביניהן מקובלת השיטה הרציונאלית. בשיטה זו, אשר יורחב עליה בהמשך בפרק השיטות, מתקבלת הספיקה המקסימאלית מתקבלת על ידי הכפלת השטח בעוצמת הגשם ובמקדם אמפירי, המיצג את אופי תכסית הקרקע. מקדם זה נקרא "מקדם הנגר לספיקת השיא" או "מקדם ספיקת השיא". קיימות גם שיטות המרחיבות את השיטה הרציונאלית, למשל שיטת התחנה לחקר הסחף "שיטת תחל"ס".

אנו מוצאים לעיתים שימוש במונח "מקדם הנגר" בלי לציין האם הכוונה למקדם הנפח או למקדם ספיקת השיא, והדבר מביא לטעויות בשימוש במקדמים הלקוחים מן הספרות והניסיון, בחישובים ובהתייחסות לתוצאות. אי לכך חשוב ביותר להבחין בין שני מקדמים אלו, ובעבודה זו נקפיד להבחין בין "מקדם נפח הנגר" ל"מקדם ספיקת השיא".

המונח "ספיקת שיא", או, ביתר דיוק, "ספיקת השיא בשכיחות של 1 ל-N שנים" משמש את המתכננים של מערכות הניקוז להגדרת ספיקת השיא הנגרמת על ידי אירוע גשם המופיע במוצע אחת ל-N שנים, כלומר אירוע גשם שהסתברות להופעתו בשנה כלשהי היא $(1/N)$. N נקרא "תקופת החזרה" של אירוע גשם זה. בחירת תקופת החזרה לתכנון נעשית כמדיניות שמטרתה הגנה על השטח, והיא מבטאת את חשיבותו וערכו של השטח המוגן בפני ספיקת השיא הזו.

ספיקת השיא מתקבלת באגן לאחר "זמן ריכוז", שהינו פרמטר המאפיין את האגן ומבטא את הזמן המינימאלי בו כל שטח האגן תורם להיווצרות נגר במוצא האגן.

2.2 השפעות פיתוח על ההידרולוגיה

פיתוח ובנייה באגן גורמים לשינוי תכסית הקרקע. הפרקים הבאים יעסקו בהשפעות שינוי זה על כמות ואיכות הנגר היוצא מתוך האגן, תוך התמקדות בשלושה תחומים המושפעים מפיתוח זה: הידרולוגיה, אקולוגיה וכלכלה.

על מנת לאפיין את היווצרות נפחי הנגר באגן היקוות במהלך סופה, ניתן להתייחס אל שטח פני האגן כאל נפח, אשר לו תכולת רטיבות משתנה, ובו מתקיים בפרק זמן סופת הגשם ועד לסיום זרימת הנגר מאזן הידרולוגי דינאמי. המאזן ההידרולוגי מבטא את קשר בין כמות המים הנכנסים לתוך נפח זה לבין כמות המים היוצאים ממנו וכמות המים הנשארים באגן המבוטאת כשינוי באוגר, ΔS . עבור פרק זמן נבחר כלשהו מאזן המים הוא: (Walesh, 1989):

$$(2.1) \quad Q_{in} = Q_{out} + \Delta S$$

הרכיבים המרכיבים את Q_{in} , כמות המים הנכנסים לאגן, הינם:

P – משקעים: גשם, טל, שלג וברד.

R_{in} – נגר עילי הנכנס לתוך תחומי האגן משטחים גבוהים ממנו, המזרימים אליו מים.

הרכיבים המרכיבים את Q_{out} , כמות המים היוצאים מתוך האגן, הינם:

E – התאדות, שהיא המים אשר מתאדים מפני הקרקע ומתוך מים עומדים או זורמים, החשופים לאטמוספירה, כגון נגר עילי ושלוליות.

T – דיות, מנגנון בו מים נשאבים מתוך הקרקע על ידי צמחיה ומשחררים לאטמוספירה בפאזה גזית מתוך העלווה.

I – חלחול, חדירה של מים לתוך תווך הקרקע וחדלים להיות נגר על-קרקעי.

R_{out} – נגר עילי היוצא מתוך האגן בנקודת הניקוז שלו.

אם כך, הביטוי המלא למאזן הנפח, המהווה הרחבה של משוואה (2.1) הינו:

$$(2.2) \quad P + R_{in} = E + T + I + R_{out} + \Delta S$$

על ידי העברת אברים בין האגפים מתקבל הביטוי:

$$(2.3) \quad P + R_{in} - E - T - I - R_{out} - \Delta S = 0$$

משוואה זו מבטאת את המאזן ההידרולוגי באגן עבור פרקי זמן של סופה או סידרה של אירועי גשם.

ניתן לבודד את השינויים בנפחי הנגר היוצאים מתוך אגן היקוות כתוצאה מפיתוחו על ידי השוואת המאזן ההידרולוגי בין מצבו הטבעי ובין מצבו לאחר פיתוח האגן.

האינדקס t מבטא את האגן במצבו הטבעי, והאינדקס $t+1$ מבטא את מצב האגן לאחר פיתוח. את הפרמטר ΔS , שינוי האוגר, יחליף הפרמטר S , המבטא את יכולת האגן לאגור מים עבור מצב פיתוח נתון:

$$(2.4) \quad P^{t+1} + R_{in}^{t+1} - E^{t+1} - T^{t+1} - I^{t+1} - R_{out}^{t+1} - S^{t+1} = P^t + R_{in}^t - E^t - T^t - I^t - R_{out}^t - S^t$$

כמות הנגר הנכנסת לאגן, R_{in} , אינה מושפעת מהפיתוח באגן. כמו כן ניתן להניח כי כמות הגשם P , אינה משתנה בצורה משמעותית בעקבות הפיתוח ולכן ניתן להחסיר פרמטרים אלו מהמשוואה ולקבל:

$$(2.5) \quad E^{t+1} - T^{t+1} - I^{t+1} - R_{out}^{t+1} - S^{t+1} = E^t - T^t - I^t - R_{out}^t - S^t$$

איחוד הפרמטרים של אידי E , ודיות T , לפרמטר ET – אוופורנספירציה, ובידוד משתנה הנגר העילי היוצא מתוך האגן R_{out} יוצרים את המשוואה הבאה:

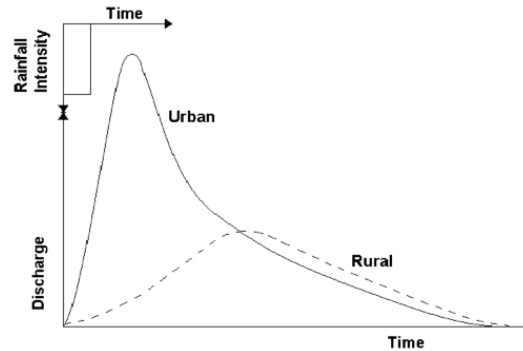
$$(2.6) \quad \Delta R_{out} = \Delta ET + \Delta I + \Delta S$$

מתקבל כי השינוי בנפח הנגר היוצא מתוך אגן עקב סופה בעקבות פיתוח תלוי בשינוי הפרמטרים אוופורנספירציה, חלחול ויכולת האגן לאגור מים. בכדי לקבל את הכמות הכוללת של הנגר עבור מספר סופות (למשל כל הסופות של עונת גשמים אחת) יש לסכום את הנפחים של הסופות הבודדות.

פרמטר נוסף המשמש לאפיון תגובת האגן לאירוע גשם באגן היקוות הינו ספיקת הנגר ביציאה מן האגן, קרי ההידרוגרמה. סך השטח מתחת להידרוגרמה מבטא את נפח הנגר שהתקבל כתוצאה מאירוע הגשם. צורת ההידרוגרמה ושטחה נקבעים על פי עוצמות הגשם במהלך הסופה ופרמטרים של האגן: צורה, שיפוע, תכסית, רשת הערוצים. אי לכך, כאשר חלים שינויים בפרמטרים של האגן, למשל על ידי בנייה עירונית, משתנים צורת ההידרוגרמה ושטחה.

באיור 1 ניתן לראות את התגובה ההידרולוגית האופיינית של אגן לפיתוח. ההידרוגרמת האגן בצורתו הטבעית מבוטאת על ידי הקו המקוקו והידרוגרמת האגן המפותח על ידי קו מלא. משך תגובת האגן וזמן הריכוז באגן המפותח הינו קצר יותר מזה של האגן הטבעי, הסבר לתופעה זו ניתן בתכסית היוצרת יותר

נגר ומאפשרת לו לזרום במהירות רבה יותר בשטח אטום וכן בכבישים ומובילי ניקוז אשר מאפשרים זרימה מהירה יותר ודרך קצרה יותר עבור המים אל המוצא. ניתן לראות כי בציור סכמטי זה כי נפח הנגר מן הסופה וספיקת השיא שלה גדולים באגן בנוי מאשר באגן לא מפותח. עלית הנפח נובעת בעיקר מהקטנת החלחול (Walesh, 1989).



איור 1 - הידרוגרמה של אגן בלתי מפותח ואגן מפותח

Figure 1 – Hydrographs of an undeveloped (rural) and developed basin

2.2.1 כמות מים – נפחים וספיקות

המרת שטחי אגן טבעיים, אשר מאופיינים בתכסית לא אחידה וחדירה לשטחים עירוניים המאופיינים בתכסית חלקה, אחידה, ובעלת חדירות נמוכה, מובילה לשינוי בתגובת האגן לאירועי גשם. ככל שגדלים האחוזים של שטחים עירוניים באגן כגון חניות, מדרכות, גגות וכבישים המאופיינים בחדירות נמוכה, נפגעת יכולת האגן להחדיר מים לתוך הקרקע ומתרחש גידול בנפח הנגר. אחת מהתוצאות הנוספות של שינויים אלה היא פגיעה בכמות מי התהום (Schueler, 1994).

בנוסף לעליה בנפח הנגר, מעלה המרת שטחים טבעיים את מהירות הזרימה. התכסית הטבעית בעלת הטופוגרפיה המחוספסת אשר טבועים בה מכשולים כגון עצים, שיחים ואבנים מוחלפת בשטחי בטון ואספלט. אלו תורמים לעלייה במהירות הזרימה וכוחות הגזירה של המים. תוצאות ישירות של תופעה זו הינם בלייה של נחלים, סחיפת קרקע, והעלאה של העכירות והטמפרטורה בגופי המים העיליים אליהם מתנקז הנגר (Gilbert 2006) וכן עקירת צמחים בעלי בית שורשים אשר לא תואם את כוחות הגזירה הנוצרים מהזרימה החדשה (Bledsoe 2000). שינויים אלו במשטר ההידרולוגי עקב הפיתוח עלולים לפגוע במאזן האקולוגי בשטחים במורד הזרם, המקבלים את עודפי מים מתוך אזורים אשר עברו פיתוח (Walesh 2000).

Maidment (1992) מסכם בספרו כיצד שינויים בתכסית ובשימושי הקרקע באגן מובילים להשפעות הידרולוגיות בקנה מידה מקומי, אזורי וארצי. למשל, כריתת חורש טבעי מובילה לארוזיה בנחלים

כתוצאה מספיקות גדולות יותר, המלחת מקורות מים ועליה בקצב חדירת מוצקים מומסים למי התהום, ולעומת זאת נטיעת יערות יכולה להוביל לצמצום הנגר המתקבל במורד, שינוי תוואי הזרימה הקיים ועליה בחומציות הנגר. הוספת שטחים חקלאיים באגן יוצרת סיכון של חדירת דשנים, חומרים קוטלי מזיקים וחומרי הזנה למי התהום.

בנוסף לשינויי התכסית המאפיין את תהליך העיור, מושפע האגן מהוספת מערכת ניקוז המורכבת מצינורות ותעלות המוליכים את המים בדרכים קצרות יותר ובמהירויות גדולות יותר אל המוצא. דבר זה מעצים את ההשפעות אשר תוארו לעיל ותורם לקיצור זמן תגובת האגן לאירועי גשם (Sheaffer et al 1982).

בין המחקרים שנעשו בארץ בנושא השפעות תהליך העיור על נפחים וספיקות ניתן למצוא את עבודת התזה של דורון רגב (1993) "ניצול נגר על קרקעי באמצעות מערכות ביוב". במסגרת המחקר הוצבה תחנה רישמת מכוילת למדידת מפלס באפיק נחל גיבורים, המנקז את מרכז העליון של העיר חיפה לכיוון המפרץ. עבור הנתונים המדודים, נבנתה סדרת רגרסיות שבוחנת את הקשרים הבאים:

1. עוצמת הגשם הסופתית הממוצעת – נפח הסופה.
2. עוצמת הגשם הסופתית הממוצעת – ספיקת שיא.
3. עובי גשם כולל בסופה – נפח הנגר.
4. גשם יומי – נפח הנגר.

נמצא כי בשלוש קבוצות ההתייחסות הראשונות המתאם נמוך. ביחס האחרון המתאם משופר אך עדיין ניכר תחום נרחב של פיזור נקודות הרחק מקו הרגרסיה שמתוכו ניתן לדלות את מקדם נגר לגשם היומי באגן. בעבודה זו ההתייחסות הינה סטטיסטית בלבד, לנתונים מדודים, ללא שימוש במודלים הידרולוגיים.

מחקרים נוספים שעסקו בהשפעות פיתוח על נפחי הנגר באגני היקוות נעשו על ידי קבוצת חוקרים מהפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית בהנחייתה של פרופסור רונית נתיב ז"ל. מטרה עיקרית של המחקר הייתה לאבחן את דרגת הזיהום של מי הנגר בעיר אשדוד ואת האפשרות לנצלם (אסף וחובריו 2002). חושב היחס בין נפח הנגר לנפח הגשם באגני היקוות בעיר אשדוד, ששטחה הכולל כ-47 קמ"ר. בוצעו מדידות במוצאם של ארבעה אגני משנה, אשר שטחם נע בין 0.73 ו-3.9 קמ"ר, המנקזים כ-75% משטחה של העיר. במסגרת המחקר, אשר התמקד במדידת פרמטרים של איכות מים, הוקמו שלוש תחנות למדידת גשם אשר אפשרו לחשב את היחס בין הנגר לבין הגשם. הניתוח ההידרולוגי התבסס על יממות ולא על סופות, ונמצא טווח רחב של מקדמי נפח נגר. לעומת ערך נמוך של 1% עבור אגן אזור התעשייה התקבל ערך גבוה של 45% עבור אגן הנחצה ע"י נקז הפארק, מקדם נפח הנגר המשוקלל של השטחים הנבדקים היה 0.25, לא הוצע הסבר לממצאים אלו. (Asaf et al, 2004, Yaara. et al, 2007, Dahanal, 2005).

בדו"ח "מציאת מקדם הנגר העילי בסביבה עירונית" (ענבר וחובריו, 2005), שנכתב באוניברסיטת חיפה עבור נציבות המים מסוכמים ממצאים עבור חמישה אגני היקוות באזור חיפה. באגני היקוות אלו נמדדו כמויות הגשם והנגר במוצא וחושבו מקדמי נפח וספיקת הנגר. באמצעות שימוש בתוכנת GIS, כומתו פרמטרים שונים של האגן כגון סוגי וכמויות התכסיות השונות והשיפועים באגני היקוות, וחולצו זמן הריכוז של האגן והיחס בין השטח האטום לבין השטח הכולל של האגן. הרזולוציה הגבוהה של תוכנת GIS במדידת פרמטרים גיאוגרפיים כגון שטחים ושיפועים איפשרה חישוב נפחי נגר וספיקות שיא עבור סופות שונות ברמת דיוק גבוהה ותוצאות אלו הושושו לערכים המדודים במוצא.

בהשוואות אלו, התמקד המחקר במטרות הבאות:

- מציאת מקדם נפח הנגר העילי הממוצע בשטחים עירוניים.
 - הערכת מקדם ספיקת הנגר העילי באירועי שיא באמצעות הנוסחה הרציונאלית.
 - הערכת פוטנציאל הנגר העירוני על ידי הכפלת נפח הנגר העונתי במקדם נפח הנגר של אגן ניקוז עירוני.
 - הבחנה בין תרומת השטחים האטומים של אגן הניקוז העירוני לבין השטחים הטבעיים שלו.
- כמו כן הושוו הערכים המדודים עם אלו אשר התקבלו משימוש בשיטת SCS של השרות לשימור הקרקע בארה"ב (תידון בפרק 4), במטרה לאמוד את יכולת החיזוי של המודל עבור תנאי הארץ.

המסקנות שהתקבלו הינן:

- אחוז השטח האטום הינו המרכיב העיקרי בקביעת מקדם נפח הנגר.
- השימוש במודל SCS סביר באירועים בהם כמות הנגר אינה עולה על 40 מ"מ. מעבר לכך מייחס המודל תרומה גבוהה מדי לנגר משטחי האגן החדירים למחצה.
- עבור השיטה הרציונאלית לא נמצא קשר מובהק בין מקדם הנגר לפרמטרים שונים של תכסית ושיפוע באגני ההיקוות השונים.

2.2.2 איכות הנגר העירוני

ניתן לחלק את כלל מקורות זיהום המים לנקודתיים ולא נקודתיים. דוגמאות למהמים נקודתיים ניתן לראות בתחנות דלק ובמיכלי אחסון שפכים או כימיקלים, כאשר תחזוקתם לקויה. כיוון שקל יחסית לזהות ולאפיין מהמים נקודתיים, ניתן על ידי יישום כלים שונים, כגון הוספת מיתקני טיפול מתאימים, אכיפת חוקים והעלאת רמת הבקרה, לצמצם את כמות המזהמים הנפלטים ואת השפעתם. נגר עילי מהווה מזהם לא נקודתי, דבר המקשה הן על מדידת מאפייניו והן על בקרתו (MPCA, 2008).

תהליך הפיתוח משפיע אל איכות מי הנגר על ידי שני מנגנונים. מנגנון אחד הינו הגדלת כמות המים ומהירות זרימתם ובכך יצירת מוביל בעל יכולת קיבול גדולה יותר. המנגנון השני הינו החלפת צמחייה

ותכסית מחוספסת בתכסית הומוגנית וחלקה יותר, דבר המקל על סחיפת מזהמים שונים עם הזרם. כאשר הנגר זורם למקורות מים עיליים או מחלחל למי התהום, אלו עלולים להיפגם כתוצאה מנוכחות מזהמים במי הנגר (Schueler, 1994). סוגי המזהמים וריכוזם במי הנגר תלויים באופי השטח אשר בו נוצרו. כיוון שאזור עירוני מאופיין במגוון רחב של תכסיות שונות, כך גם קיים מגוון רחב של מזהמים במי הנגר.

סוג אחד של מזהמים האופייניים למי נגר הינם המוצקים המרחפים. אלו חלקיקים של חומר אורגני או משקעים אשר נכנסים לתוך גופי המים כתוצאה מבלייה והסעה על ידי סחף, רוח או פעולות אדם כגון חקלאות ובנייה. יצירת מזהמים אלו אופיינית לשטחים העוברים בנייה ופיתוח. מקור נוסף ליצירת מוצקים מרחפים הינו בלייה של גדות נחלים, אשר כתוצאה מהגדלת השטחים האטומים במעלה האגן, האופיינית לפיתוח, מהירות הזרימה בהם עולה ולכן עולים גם כוחות הגזירה.

בין הבעיות אשר מוצקים מרחפים יוצרים ניתן למצוא פגיעה במערכות האקולוגיות של גופי המים המקבלים מים אלו על ידי עליה בעכירות, סתימת מערכות ניקוז והורדת מוליכות הקרקע כאשר המים שוקעים. כמו כן עלולים חומרים אלו לפעול כנשאים של מזהמים אחרים, כגון נוטריאנטים, מתכות, תרכובות שמנים וחומרים אורגנים (USEPA, 1977).

מזהמים נוספים האופייניים למי נגר הינם נוטריאנטים, אשר בריכוזם הטבעי הינם הכרחיים להתפתחות צמחים, אך מהווים גורם מזיק כאשר ריכוזם גדל. שטחי נוי אשר תחזוקם דורש הוספת דישון ואזורים בהם אנשים וחיות מחמד מבלים את זמן הפנאי מהווים מקור לחומרים כימיים ולרוב אורגני המשמשים כנוטריאנטים למזיקים שונים.

תרכובות זרחן יוצרות נזק כאשר הן מתנקזות באמצעות נגר לגופי מים פתוחים ויוצרות תנאים להתפתחות אצות ובקטריות. באם תרכובות הנקן חודרות לגופי מים אלו יתכן תהליך של ניטריפיקציה, המהווה מתחרה לחמצן המומס במים. כתוצאה מכך עלולות חיות בגופי מים אלו למות מחנק. חדירת תרכובות הנקן שונות למי התהום וצריכתן עלולה להוביל לפגיעות שונות בתינוקות ולסרטן באוכלוסיה בוגרת באם הן נצרכות לאורך זמן (Freshwater Foundation, 1988).

גורמי זיהום נוספים בעלי חשיבות, המאפיינים שטחים עירוניים הינן תרכובות שמנים. אלו מתקבלות מפליטות של כלי רכב ומאזורי תעשייה. כאשר תרכובות אלו חודרות לתוך הקרקע מתחיל תהליך של פירוק מיקרוביולוגי של השמנים, אשר בניגוד לפירוק המבוצע על ידי צמחיה, מוביל לשינוי בפרמטרים שונים בקרקע, כגון ירידה במוליכות הידראולית, עליה במוליכות החשמלית ושינויים ביכולת קיבול וחילוף קטיונים (Cunningham et al., 1991; Bennet et al. 1995).

Pitt (1996) מסכם בספרו מידע שנאסף בעשר ערים בארצות הברית מ-1979, עבור מאפייני איכות וכמות מי נגר עירוני. מתוך הנתונים שנאספו ניתן לראות כי החלפת השטח הטבעי באגן בשטחים אורבניים מגדיל את כמות וריכוז המזהמים בנגר כאשר השטחים התורמים ביותר לתופעה זו הינם גגות,

שטחי חנייה אטומים, שטחי אחסון אטומים, שטחי חניה ואחסון לא אטומים, שבילים, כבישים, שטחים פתוחים, שטחים טבעיים, כבישים מרכזיים, ומשטחי שירות למכוניות.

ריכוזי פרמטרים שונים בנגר המתקבל מאגנים טבעיים הושושו עם אלו המתקבלים מאגנים מפותחים ואופיינו סוגי וריכוזי המזהמים עבור תכסיות שונות:

- ריכוזי עופרת ואבץ מאפיינים נגר הנוצר ברחובות ובמשטחי חנייה. כמו כן נמצאו ריכוזים גבוהים של אבץ במים שנוקזו ממרזבי גגות.

- מי נגר ממדרכות, כבישים, ואזורים אחרים בהם כלבים עושים את צרכיהם אופיינו בריכוזים גבוהים של בקטריות.

- כבישים ואזורי שירות של מכוניות אופיינו בריכוזים גבוהים של קנקיזים, קרום, נחושת, עופרת, ניקל ותרכובות אורגניות שונות.

- באזורי אחסון נמצאו ריכוזי העופרת הגבוהים ביותר ובשטחים פתוחים הובחן ריכוז הניקל הגדול ביותר.

- כמו כן, אזורי תעשייה אופיינו בריכוזים גבוהים של מזהמים שונים, אשר סוגם תלוי באופי התעשייה במקום. ריכוז מזהמים אלו בנגר ירד ככל שזה התרחק ממקור היווצרו.

מי נגר הנוצרים בכבישים ובצידי דרכים זהו כתורמי החנקות המרכזיים בזיהום מי תהום, זאת כתוצאה מנוכחות פליטות רכבים ומחומרי דישון המשמשים לפיתוח נופי בצידי הכביש. כמו כן דליפות מצנרת הביוב או הצפתה מהוות מוקד זיהום של חנקות למי התהום.

שימוש בקוטלי מזיקים בשטחים פתוחים ובמוקדי נוף עירוניים בא לידי ביטוי בנגר הנוצר משטחים אלו. חומרים אלו קושרו עם מחלות כגון סרטן, מחלות עצבים, פגמי לידה, עקרות ומגוון רחב של פגיעות מערכתיות אחרות.

כיום ישנו מגוון רחב של חומרים מסוג זה, הנמצאים בשימוש. לכל אחד מהם קצב התפרקות שונה וחלקם בעלי יכולת עמידות גבוהה. על כן גדל זמן השהות שלהם במאגר המים אליו הם מתנקזים ומאחר יותר, כאשר זה מחלחל לקרקע, במי התהום (Pitt et al, 1996).

Gilbert et al. (2006) מדדו ריכוזי מזהמים, סך מוצקים מרחפים, נוטריאנטים, חנקות, זרחן, נחושת, עופרת ואבץ, בנגר הנוצר מתוך משטחים עירוניים שונים כגון אספלט, משטחים מרוצפים ומשטחי אבנים גרוסות. נמצא כי מלבד ריכוז הזרחן, אשר היה נמוך יותר במשטחי האבנים הגרוסות, ריכוזי המזהמים דומים בנגר הנוצר משטחי אבנים גרוסות ומשטחי אספלט. כמו כן נמצא כי משטחים מרוצפים מיצרים את הריכוז הנמוך ביותר של מזהמים.

בשל כמותו ההולכת וגדלה של הנגר ככל שמתקדמים תהליך העיור והמרת השטחים הטבעיים לאטומים, ניכרת השפעתו על גופי המים המקבלים אותו - נחלים, מאגרי מים ומי תהום. כיוון שהמזהמים המובלים

בנגר מצטברים בגופים אלו, גם אם ריכוזם קטן במי הנגר במקור, בגופי המים המקבלים אותו הוא גדל בהתמדה לאורך ציר הזמן. (Cannon 2009)

פרק של ארמון בדו"ח כרמון ושמיר (1997) עוסק בהשפעות שטחים עירוניים על איכות גופי מים וממליץ על מספר מזהמים הדורשים ניטור. המזהמים הכימיים אשר אותם הוא ממליץ לנטר במי נגר הינם נוטריאנטים, מוצקים מרחפים, חומרים אורגנים, חומרים אורגנים נדיפים, סך חומר אורגני, קוטלי מזיקים, מתכות כבדות, כלור, נתרן, ברומיד, מגנזיום וסידן. בדומה למזהמים כימיים, גם במזהמים ביולוגיים קיים מגוון רחב של מזהמים כגון בקטריות, פרוטוזואה ווירוסים. לאלו ישנה יכולת עמידות והתרבות אשר תלויה בסוג המזהם ובתנאי סביבתו. כאשר הם חוזרים אל מי התהום תיתכן התפרצות מהירה של מחלה. דוגמה לכך ניתן לראות בחשיפת הווירוס Hepatitis A virus לציבור האזרחים בדלהי שבהודו דרך צריכת מים אשר לא טופלו כהלכה וגרם לחולי ב-28,745 איש (Berg, 1967). למרות שמי נגר לרוב אינם מאופיינים במזהמים ביולוגיים, ממליץ ארמון לבצע ניטור של פתוגנים מסוימים.

במסגרת המחקר שנערך באשדוד על ידי חוקרים מהאוניברסיטה העברית (שהוזכר בסעיף הקודם) נמדדו כמויות ואיכות הנגר העירוני וכן ריכוזי מזהמים בנגר עצמו ובמים המחלחלים לקרקע תוך התקדמותם בתווך הלא רווי. פרמטרי האיכות הושוו בין אזורים של קרקעות לא מפותחות, חקלאיות, ועירוניות. נמצא כי בשטחים לא מפותחים ישנו ריכוז מלחים בחלקו העליון של התווך הלא רווי כתוצאה מהתמוססות גיר ואידוי בסמוך לפני הקרקע. בקרקעות חקלאיות נמצא ריכוז מלחים גבוה וקבוע לאורך התווך הלא-רווי, תוצאה של דישון ושטיפתו בהשקיה וגשמים. בשטחים עירוניים נמצא בתווך הלא רווי ריכוז מלחים גבוה משטחים לא מפותחים אך נמוך מזה של שטחים חקלאיים. (Yaara et al, 2007, ו- Dahanal, 2005, et. , Asaf et al., 2004).

להשתנות התגובות ההידרולוגיות של האגן כתוצאה מפיתוח, הבאות לידי ביטוי בכמות ואיכות הנגר, ישנן נגזרות כלכליות. חלק גדול יותר מנפחי המים אשר היו מחלחלים לקרקע ומעשירים את מי התהום באגן היקוות טבעי זורמים כנגר עילי כתוצאה מתהליך העיור ואינם חוזרים לקרקע. מים אלו, אשר הינם בעלי ערך כלכלי, אינם מנוצלים כאשר הם מנותבים למערכת הניקוז וזורמים לים ללא שימוש.

באם איכות מי התהום באזור המפותח נפגעה או כמותם התדלדלה כתוצאה מהפיתוח יהיה צורך להוביל מים ממקורות חלופיים, פעולה הדורשת הקצאת משאבים ואנרגיה ולה השלכות כלכליות אשר ניתן להקטין באם משתמשים בנגר באופן ישיר (Braden and Johnston, 2004).

העלייה בנפחים ובזרימות הנגר כתוצאה מפיתוח חלקים מהאגן מעלה את הסיכון להצפות ולנזקים במורד. הצפות אלו, בנוסף לסיכון האפשרי לבריאות וחיי אדם, יוצרות נזקים כלכליים כבדים. בנוסף, עודף הנגר ועוצמתו יוצרים צורך במערכות ניקוז גדולות ויקרות המסוגלות להעביר נגר מסופות תכן נדירות שעוצמתן גבוהה מאד.

מאינדך, בנייה אשר משלבת ניהול נגר ושימוש בו לשיפור הנוף העירוני בלי לגרום נזקים יכולה להוביל לעלייה של עד 5% בערכי הנדל"ן בשטח כולו ולעלייה של עד 15% בערכי נדל"ן הסמוכים לגופי מים המשולבים בנוף ומוזנים ממי נגר (Braden and Johnston 2004).

נושא ההשפעות הכלכליות לא טופל במחקר הנוכחי.

2.3 תכנון רגיש למים – תר"מ

תכנון רגיש למים הינו חלק מפיתוח בר-קיימא, אשר עקרונותיו הם לאפשר פיתוח אשר ישפר את רמת החיים של הדור הנוכחי תוך מזעור הפגיעה במשאבים הדרושים לדורות העתיד. תר"מ מתרכז במים כמשאב אשר יש להתייחס אליו במהלך פיתוח שטחים מתוך אותו העיקרון של צמצום נזקי פיתוח ויצירת תועלת. פיתוח בגישת תר"מ גורס כי יש לתת לשיקולי מים משקל רב בשלבים הראשונים של התכנון. בין שיקולי המים הרלבנטיים ביותר יש לתת מקום לשיקולי שימור והגנה על מקורות מים (בעיקר כמות ואיכות מי תהום), שימור ושיקום נחלים וגופי מים אחרים, מניעת נזקי שיטפונות וחסכון במים.

תר"מ מחליף את המונח "ניקוז" ב"ניהול הנגר וניקוז" ובכך מדגיש כי הנגר הינו משאב ולא רק מטרד שיש לסלקו בכדי למנוע נזקי הצפות. עם זאת, השארת "ניקוז" מדגישה כי מניעת נזקי הצפות הינה מטרה חשובה בכל מקרה. בניגוד לתכנון ניקוז קונבנציונלי, אשר מתייחס לנגר כמטרד אשר יש לסלקו במהירות, תר"מ מתייחס לנגר כמשאב מועיל, אשר על ידי ניהולו על פי עקרונות של מזעור נפחים, ספיקות שיא וזיהום הנגר היוצאים מכל יחידת שטח מפותח, יצומצמו נזקי הפיתוח ויושגו תועלות נוספות.

כל אזור מאופיין בנתונים שונים: מטאורולוגיים, טופוגרפיים וגיאולוגיים, קיום או העדר מי תהום ועומקם, תכונות הקרקע בשכבה הבלתי רוויה עד מי התהום, גורמי זיהום בשכבה זו ואיכות מי התהום (אם קיימים). כמו כן, קיים מגוון רחב של תכניות פיתוח למגורים, שטחי ציבור, תעשייה, נופש וטבע ולכן לא ניתן להתוות תכנית פיתוח אחת אוניברסלית. תר"מ בוחן כל אזור פיתוח לגופו ומציע פיתרונות אשר משיאים את התועלת הנקייה (תועלת פחות עלות) המופקת מהשגת המטרות המתאימות לאזור הנדון, בשקלול נאות ביניהן.

מטרותיו העיקריות של תר"מ הינן:

- תרומה למשאבי המים: העשרת האקוויפרים הן בכמות והן באיכות, תוספת למשאבי המים כתוצאה משימוש ישיר בנגר העירוני וחסכון כתוצאה משימוש ישיר של המים בסקטור העירוני ומחזור מים אפורים.

- תרומה ליצירת סביבה איכותית ירוקה-כחולה ובריאה: שיפור התפקוד האקולוגי בקרבת אזורים מגורים, שיקום נחלים ואגמים, תוספת איכותית לנוף העירוני.
- הקטנת הצפות ונזקיהן וייעול הניקוז העירוני: על ידי השהיה, אגירה והחדרה של הגשם בסמוך למקום היווצרותו יורדת שכיחות ההצפות ומצטמצמים נזקיהן באתר ובמורד.

כמו כן תר"מ יוצר מספר תועלות נלוות:

- תועלות כלכליות: ערך המים הנוספים, חיסכון בהוצאות הנגרמות מהצפות, הקטנת צנרת ניקוז וחיסכון בבנייתה, חיסכון בתשלומים עבור מים, עלית ערך נדל"ן באזורים סמוכים לנוף ירוק-כחול.
- תועלות חברתיות: על ידי שיתוף הציבור ועירובו בתהליך הפיתוח יוצרים מודעות ועניין בנושאים אקולוגיים בכלל ובשימור מים בפרט (שמיר וכרמון, 2007).

2.3.1 אמצעים ליישום מטרות תר"מ

על מנת לצמצם את נפחי הנגר, ספיקות השיא והפגיעה באיכותו, ניהול הנגר ינקוט בפעולות טיהור, אגירה, השהיה, וויסות והחדרה. פעולות אלו מתאפשרות באמצעות כלים שונים. את הכלים העומדים לרשות המתכנן לצורך ניהול משאב המים באגן ניתן לחלק לשני סוגים - עקרונות תכנון וכלים הנדסיים. עקרונות התכנון הינם כללים לפריסה מרחבית ועיצוב של התכסיות באגן. כללים אלו קיימים עבור כל קנה מידה של פיתוח מרמת המגרש, המבנה, השכונה ועד כלל אגן היקוות (אגן הנחל כולו). הכללים העיקריים לניהול הנגר בשיטת תר"מ הינם:

- צמצום השטחים האטומים באגן;
- מיקום השטחים האטומים במעלה האגן והכוונת הנגר הנוצר בהם אל השטחים החדירים;
- קטיעת רצף השטחים האטומים על ידי מיקום שטחים חדירים אשר יוכלו לקלוט ולהחזיר את הנגר הנכנס אליהם.
- העברת מי הנגר דרך שטחי צמחייה, אלו תורמים לסינון מוצקים מרחפים ומזהמים אחרים.
- יצירת מסלול ארוך עבור תנועת המים, ככל שיאריך זמן הזרימה כך יתאפשר למי הנגר לחלחל או להתאדות ובכך תקטן כמות הנגר העילי ויקטנו ספיקות השיא.
- החדרת הנגר לקרקע באזור הקרוב ביותר למקום היווצרותו.

הכלים הנדסיים המשמשים לניהול הנגר הינם רבים ומגוונים ורובם מבצעים מספר מטרות, אך ניתן לחלקם על פי המטרות הראשיות אותן הם משרתים - טיהור, אגירה, השהיה, וויסות והחדרה.

מספר מתקני ניהול נגר אשר נעשה בהם שימוש במהלך יצירת חלופות פיתוח במהלך המחקר מובאים להלן, כמו כן מתקנים נוספים אשר לא נעשה בהם שימוש ישיר במהלך יצירת החלופות אך נמצא כי אלו רלוונטיים לאזור הפיתוח וניתן לשלבם אף אם לא ניתן לכך ביטוי בעבודה זו:

מתקני טיהור

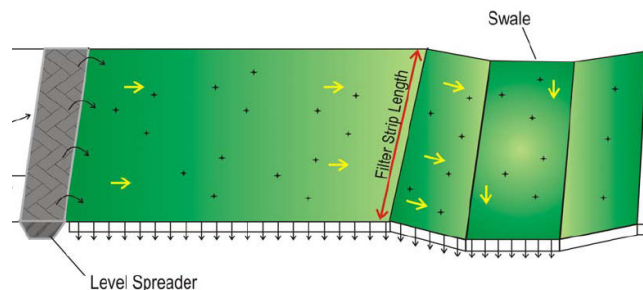
- **Filter strips – רצועות צמחייה**

שטחי צמחייה דרכה עובר הנגר. רצועות צמחייה מתאימות לקליטת נגר מכבישים, מרזבי בתים ושטחי חניה קטנים. הן מתאימות למדרון מתון, בו הצמחייה יכולה להיקלט בקלות. כיוון שהינן בעלות יכולת פרוק וקליטה של מזהמים.

- **Vegetated buffers – צמחייה ממתנת**

משטחי צמחייה אשר שוברים את הרצף העירוני האטום. משמשים כמסנני משקעים, נוטרינטים ומזהמים מזרימה עלית וממי תהום גבוהים. מעלים את איכות המים לפני הגעתם לתוך נתיב הזרימה על ידי סינון, פרוק וספיחה של מזהמים, משמשים כממתני ספיקות שיא, מגדילים חלחול, מונעים בלייה של הקרקע ושל גדות מוביל המים ומספקים נישה אקולוגית. כאשר משטחים אלו ממוקמים לאורך אפיקי זרימה מתקבל גם יתרון של שיפור הנוף.

מתקנים אלו ישולבו בתוכניות חלופיות לפיתוח גבעת זמר באופן אשר יפורט בפרק 5.



איור 2 - רצועות צמחייה (UFC, 2004)

Figure 2 – Vegetation strip (UFC, 2004)

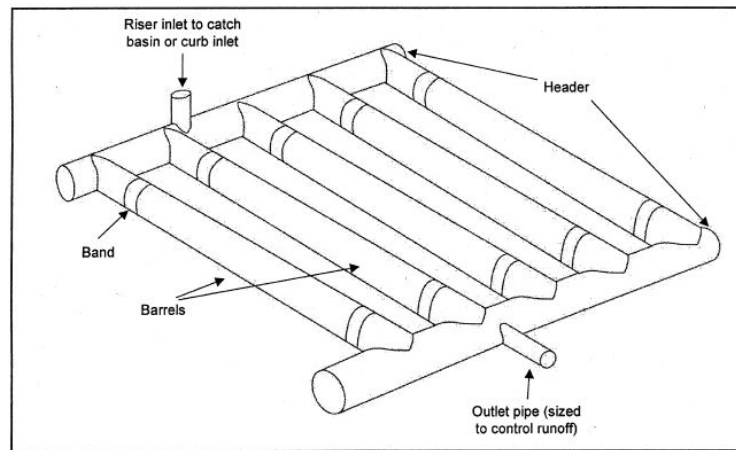
מתקני אגירה

- **Rain barrels – חביות גשם**

חביות אטומות המונחות במוצא מרזבים או בנקודות ניקוז של גגות. משמשות לאגירת מי גשם המובל מהן במשאבות או בכוח הגרביטציה. מאפשרות שימוש מאוחר יותר במים להשקיית גינות או כל שימוש אשר אינו לשתייה או בישול. למרות שמתקן זה לא משולב בתוכניות הפיתוח החלופיות של גבעת זמר ניתן יהיה לשלבם גם מאורח יותר, בכל שלב של הפיתוח עבור כל חלופה על מנת לנצל את המים הנאגרים בהם.

מתקני אגירה/השהייה תת קרקעיים

- משמשים לוויסות ספיקות, מבנה המתקן משתנה אך השפעתו תלויה בנפח המתקן, ככל שזה יותר גדול כך השפעתו ניכרת יותר. יציאת המים מהמתקן הינה דרך פתח המיועד לכך או מקרקעיתו. באם זו בעלת כושר חדור גבוה. יתרון המתקן במיקומו מתחת לפני השטח ולכן אינו תופס שטח פיתוח. מתקן זה ישולב בתוכנית הפיתוח החלופיות המוצעות עבור גבעת זמר, בשתי גרסאות, בנקודת הניקוז של האגן, האחת כמתקן השהייה בו מים נכנסים ויוצאים מפתח הניקוז בצורה מבוקרת והשנייה כמתקן אגירה זמני למי נגר בו המים נכנסים למתקן ומחלחלים מתחתיתו. אופן השימוש במתקנים וגודלם יפורט בפרק 5.



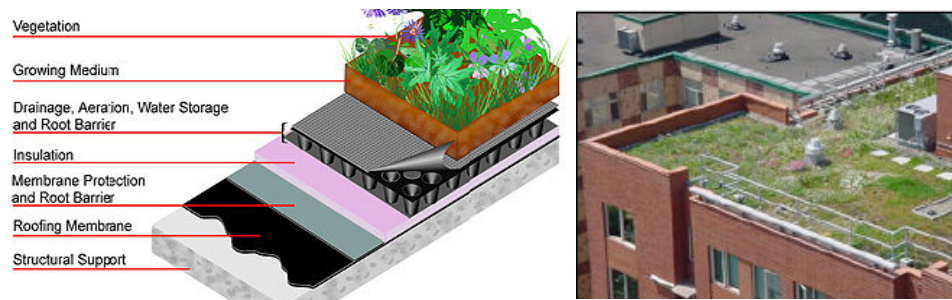
איור 3 - מתקני אגירה/השהייה תת קרקעיים, מקור: Construction Products, 2000

Figure 3 – Underground detention and infiltration facilities, (Construction Products, 2000)

מתקני השהייה

- גגות ירוקים – Vegetated roofs
גידול צמחייה בשטח גגות תורם להשהיית הנגר משפר את איכות מי הנגר על ידי ספיחה וסינון מזהמים, וכמו כן מצמצם את כמות המים היוצאים משטח הגג. יש לציין כי בחודשי הקיץ תחזוק הצמחייה בשטח הגג דורש מים אך בחירת צמחים המותאמים לאקלים המקומי תצמצם חיסרון זה.
כמו כן, גגות ירוקים תורמים הן להפחתת הטמפרטורות באזורם והן להפחתת הטמפרטורות בבניין עצמו, על ידי יצירת בידוד (Niachou et al. 2001). בשל האחוז הגדול ששטחי גגות מהווים ביחס לסך שטח

האגן המפותח, למתקן זה יכולה להיות השפעה רבה כאשר הוא מיושם. מתקן זה ישולב במספר חלופות תכנון, באופן אשר יפורט בפרק 5.



איור 4 - גגות ירוקים (Chicago Metropolitan Agency for Planning)

Figure 4 – Green roofs (Chicago Metropolitan Agency for Planning)

מתקני החדרה

• תעלות עשב - Grassed swales

תעלה או מוביל רדוד אחר אשר דפנותיו מצופות צומח עשבוני לצורך ניקוז, סינון והחדרה ממשטחים בלתי חדירים. מוריד את מהירות הזרימה ומעלה את יכולת החלחול. תעלות כאלו מתאימות לאזורי מגורים, בסמוך למבנים, צידי דרכים, איי תנועה, הובלת מי מרזבים או מקורות אחרים. הן מתאימות לשטחים בעלי מדרון של עד 5% ושטח של עד 40 דונם. מתקן זה לא ישולב בחלופות התכנון בגבעת זמר, שיידונו בפרק 5.

• אגנים ירוקים - Bioretention basins/wetlands

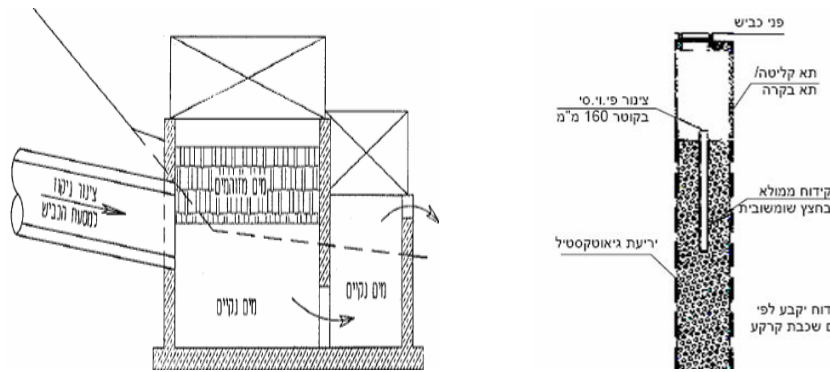
משמשים להשהיה או איגום. על ידי העברת/החדרת המים דרך בית השורשים של "צמחים אקו-טכניים" (מותאמים להשתרשות במצע רדוד ורווי מים), עוברים המזהמים שבמים תהליכי ספיחה ופירוק טבעיים בסביבה רווית מים ועתירת צמחיה. המים מוזנים מקצה אחד וזורמים אנכית מתחת לפני השטח לאורך שיפוע התחתית לכיוון המוצא. השיטה מתאימה לפארקים אזוריים שכונתיים או לאורך צירי ניקוז.

• בור החדרה - Dry well

בור ("באר הפוכה") המוזן משטחים אטומים קטנים יחסית דוגמת גגות, שטחי חניה או מדרכות. מתאימה לשטחים תלולים, בהם מתקני טיפול אחרים עלולים לא להתאים. כיוון שלבאר עצמה אין יכולת להוריד את עומס המזהמים במים יש להקפיד להשתמש בה רק עבור שטחים המספקים נגר באיכות גבוהה כאשר הוא מכוון לאתרים שבהם האיכות חשובה.

- תא סינון לתשטיפי כביש

כאשר תא כזה משולב עם בור ספיגה, הוא מסוגל להפריד בין מזהמים על בסיס שמן ודלקים מן המים. תא המלא תמיד במים מקבל את הנגר הנכנס, וכיוון שהמשקל הסגולי של מזהמים אלו נמוך מזה של המים; השמנים צפים והמים ממשיכים לבור הספיגה מתחתית התא ללא המזהמים. את השכבה העליונה של המים המזוהם בדלקים ושמנים יש לסלק (המדריך לתכנון ובניה משמרת נגר עילי, 2004).



איור 5 - בור החדרה ותא סינון תשטיפי כביש (מדריך לתכנון ובניה משמרת נגר עילי, 2004)

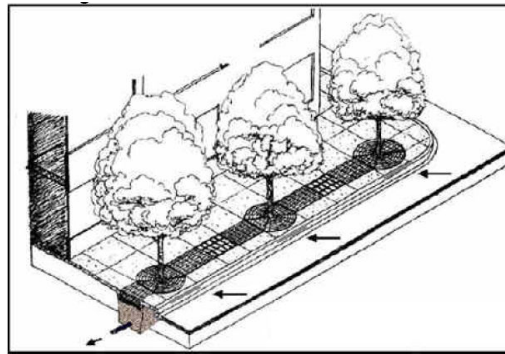
Figure 5 – Infiltration pit and filtering cell (Planning and Conservative Construction Flow Rate Handbook, 2004)

- תעלות החדרה - Infiltration trenches

תעלות עם תחתית ודפנות חדירות, במטרה לעודד החדרה מהירה של מים מכל חתך התעלה. יכולות להיות משולבות עם בורות ספיגה או מתקני חדור אחרים. כאשר הן משולבות עם מתקן השהיה נוסף כגון ברכת השהיה הן מסוגלות למתן ספיקות שיא, להעלות את איכות המים ולהעשיר את מי תהום.

- קופסת "עצי פילטר" - Tree box filter

מיכל מוטמן ומלא בקרקע המשמש כמצע מנותק בו גדלים עצים. הנגר מובל אל המתקן ומוחדר דרכו, כשבמהלך התהליך הצמחייה והקרקע סופחים ומפרקים מזהמים ומעלים את איכות המים המגיעים לאוגר הקרקע. כאשר מספר רב של יחידות כאלו משולבות בצורה מושכלת בנוף העירוני, יש להן מספר יתרונות כגון מיתון טמפרטורות, הגנה ושיחזור אפיקי זרימה, מיתון וטיפול בהצפות ושיפור הנוף העירוני.



איור 6 - קופסת "עצי פילטר" (Virginia Department of Conservation)

Figure 6 – Filtering Trees Box (Virginia Department of Conservation)

במתקנים אלו לא נעשה שימוש בחלופות התכנון בשל חוסר יכולת לחשב את השפעתם על נפחי וספיקות הנגר, אך ניתן לצפות כי שילובם בתוכניות הפיתוח יוביל להגברת ההחדרה והקטנת הנגר במוצא.

• משטחים חדירים – Permeable pavement

משטחים חדירים מאפשרים למים לחלחל דרכם ובכך לצמצום ספיקות שיא, הורדת שכיחות הצפות והגדלת אוגר הקרקע. קיום של משטחים חדירים מוביל לצמצום ולעתים אף לביטול הצורך במערכת ניקוז. (Unified Facilities Criteria USA, 2004). קיימים סוגי משטחים חדירים רבים, משטחים הבנויים מאבני ריצוף אטומות בעלי מרווח בין האבנים עצמן, משטחים הבנויים מאספלט חדיר ועוד.



איור 7 - משטחים חדירים

Figure 7 – Permeable paving surfaces

מתקן זה ישולב בתוכניות חלופיות לפיתוח גבעת זמר באופן אשר יפורט בפרק 5.

מתקני וויסות

- תעלות וויסות.

משמשות לפריסת נפה הנגר לאורך ציר הזמן ובכך להפחתת ספיקת השיא. יעילותן קטנה באזורים משופעים בעלי עוצמות זרימה גבוהות. ניתן ליישמן במספר צורות. יש להקפיד על חלל אליו יתנקזו המים ועל כך שמגלש היציאה מהמתקן יהיה נמוך מן המגלש בכניסה. במתקן זה לא נעשה שימוש בחלופות התכנון בגבעת זמר, בשל חוסר יכולת לחשב את השפעתו, אך ניתן לצפות כי שילובו בתוכניות הפיתוח יוביל להקטנת ספיקות השיא במורד.

בטבלה 1 מסוכמות התועלות העיקריות כתוצאה משימוש במתקנים השונים. בנוסף להן יכולים המתקנים לסייע גם בהשגת מטרות נוספות, גם אם אינן התועלת העיקרית.

תועלות עיקריות					מתקן
וויסות זרימה	החדרה	השהייה	אגירה לשימוש מקומי (השקיה, ניקוי משטחים מרוצפים, ועוד)	טיהור	
			X		חביות גשם
X				X	רצועות צמחייה
X				X	צמחייה ממתנת
X		X		X	גגות ירוקים
X				X	תעלות עשב
X	X	X	X	X	אגנים ירוקים
X	X	X		X	באר החדרה+תא סינון
X	X			X	תעלות החדרה
X	X		X	X	קופסת "עצי פילטר"
X	X		X		משטחים חדירים
X					תעלות וויסות

טבלה 1 - תועלות עיקריות ממתקני תר"מ

Table 1 - Main benefits from applying BMPs

עלויות מתקנים

בהשוואה עלויות שנעשתה על ידי השרות להגנת הסביבה בארה"ב (EPA 2007) בין פיתוח קונבנציונלי ופיתוח המתחשב בשיקולים הידרולוגים בהתאם לגישת LID (אשר תוצג בהמשך) הדומה לתר"מ בשימוש במתקנים, עבור 17 תכניות פיתוח עירוניות באזורים שונים בארה"ב, נמצא כי בכל האתרים (פרט לאחד) עלות הפיתוח קטנה בין 15% ל-80% ביחס לפיתוח קונבנציונלי, וזאת מעבר להשפעות הכלכליות החיוביות של גורמים כגון שיפור הנוף החזותי, עליה בערך הקרקעות עקב עליה בביקוש ומיקומם בסמוך לאזורים בעלי ערך נופי (שטחים פתוחים, מים גלויים, וכו'), הוספת שטחי מגורים ומכירתם במהירות רבה יותר (EPA 2007).

2.3.2 מחקרים וגישות דומות בעולם

קיימות בעולם גישות תכנון דומות, אשר מתרכזות בנגר כמשאב אשר יש לשמר. כרמון ושמיר (2007) סוקרים בהרחבה גישות אלו.

(LID) Low Impact Development הינה מן הבולטות שבהן. גישה זו פותחה בארצות הברית ובבסיסה העיקרון שיש לשמר את התכונות הידרולוגיות של האגן כפי שהיו במצבו הטבעי ובכללן כמות ואיכות הנגר המגיע לגופי המים במורד האגן לאחר פיתוחו (Coffman, 2000).

באוסטרליה, אשר בדומה לישראל קיימים בה ריכוזי אוכלוסיה גדולים מעל אקוויפרים פריאטיים, נעשו מחקרים רבים העוסקים בהשפעת דפוסי בנייה מקובלים וניהול המים העירוניים על כמויות ואיכות מי התהום. גובשו הנחיות אשר מטרתן למנוע או להפחית את הנזקים הנגרמים לאקוויפרים כתוצאה מעיור. הנחיות אלו רוכזו תחת הכותרת (WAWA, 1987) Water Sensitive Urban Design

באנגליה פותחה גישת תכנון ניקוז בשם Sustainable Drainage Systems - SUDS, אשר העיקרון המוביל בה הינו חיקוי של מערכות ניקוז טבעיות מתוך כוונה לצמצם ככל הניתן את חותמו של האדם על סביבתו. גישת SUDS מחייבת טיפול בנגר העירוני קרוב ככל האפשר למקום היווצרותו, האטת הזרם, טיפול טבעי באיכות המים והזרמתם באיכות טובה למקורות מים עיליים ותת-קרקעיים (CIRIA,) 2004.

מחקרים ועבודות בארץ

במהלכו של פרויקט מחקר ותכנון "ישראל 2020 - תכנית אב לישראל בשנות האלפיים" הועלתה ע"י פרופסור נעמי כרמון שאלת השפעת הפיתוח העירוני הנמרץ במישור החוף, השוכן מעל מאגר המים העיקרי של מדינת ישראל, על כמות ואיכות המים המעשירים את אקוויפר החוף. שאלה זו הובילה לסדרת מחקרים אשר נעשו בשיתוף עם פרופסור אורי שמיר, אשר עיצבו את הסוגיה הפרקטית: כיצד ניתן לתכנן את הבנייה הדרושה עבור תוספת האוכלוסייה ושיפור רמת החיים של התושבים כך שייזיקו כמה שפחות למשאבי המים העיליים והתחתיים וייצרו תועלות רבות ככל האפשר למים מניהול הנגר.

ידע רב נרכש וסוכם במחקרים קודמים של פרופ' נעמי כרמון ופרופ' אורי שמיר, במסגרת הנחיית משתלמים לתוארי מגיסטר בטכניון ובשיתוף עם עמיתים וכן על ידי מספר חוקרים במוסדות אחרים בארץ. להלן סיכום תמציתי של המחקרים שנערכו בטכניון.

עבודתה של סיגלית מירון-פיסטנר (1995) בחנה שכונה טיפוסית בשנות התשעים מבחינת הכמויות השנתיות של חלחול ונגר על קרקעי, תוך שימוש בשיטת SCS (Soil Conservation Service). עבודה זו הודגמה בשכונת קריית גנים בראשון לציון. העבודה גיבשה עקרונות לתכנון עירוני רגיש למים

במטרה להקטין את ההשפעות השליליות של הפיתוח על מי התהום מתוך דגש על הגדלת אחוז המים המחלחלים מבלי לפגוע באיכותם והתמקדות בשני אספקטים של תכנון:

- התייחסות לדגמי בינוי רצויים כולל צפיפות בנייה, כמות ומיקום שטחים סלולים, פריסת שטחים פתוחים ועוד.
 - שילוב של אמצעים הנדסיים וטכניים שונים במערך העירוני, המגבירים את העשרת מי התהום ומשפרים את איכותם כגון מרזבי גגות מחוברים לקרקע, חומרי סלילה חדירים, אגנים ירוקים, רצועות עשב ועוד.
- המסקנות העיקריות של המחקר:

- למרות מגבלותיה של שיטת ההערכה SCS, סביר להסיק כי בעקבות פיתוח עירוני ישנה ירידה משמעותית בהעשרת מי התהום.
- קיים פוטנציאל להקטנת הנזק של הפיתוח העירוני על ידי בחירה של דגמי בנייה מתאימים ועל ידי שילוב אמצעים ומתקנים אשר יגבירו את חזור המים באתר עצמו. (מירון-פיסטינר וחובריה, 1995)

לאה קרונבטר (2001), חקרה את התגובה ההידראולית של אגנים עירוניים, השפעה של שונות מרחבית, פרמטרים פיזיים ומספר חלופות תכנוניות. היא פיתחה את מודל Hydrologic (HMM) Micro Model המבוסס על המודל הנפוץ Stormwater Management Model (SWMM) שהוא מודל הידרולוגי מפורט, המבצע סימולציה של התגובה ההידראולית של אגנים עירוניים ומספק את היכולת לנתח את ההשפעה של פיזור השטחים החדירים והאטומים באגן. בכך הוא מספק כלי להשוואה בין חלופות תכנון שונות של אגן עירוני. המודל מותאם עבור נתונים של סופת גשם בודדת או רצף של אירועים. סך תגובת האגן מתקבלת על ידי חלוקת האגן לתת אגנים בעלי תכונות הומוגניות וביצוע הדמיה של התגובה ההידראולית של כך אחד מהם בנפרד וסכימתם (קרונבטר, 2001, Kronaeter et al. 2001).

שרון כץ (2001) בעבודתה "הגברה והחדרה של מי גשמים לקרקע באמצעות עיצוב החצר העירונית", זיהתה אמצעים לתכנון ולעיצוב נוף עירוני המאפשרים למתן את ההשפעות השליליות של בנייה עירונית על משאבי מי התהום ולבדוק את ישימותם לתנאי מישור החוף. מתוך סקירת ספרות ובדיקת ההיתכנות גובשו עקרונות לתכנון רגיש למים של החצר והגינה אשר שואפים לגדיל את כמות המים המחלחלים בתחום החצר. ביניהם הגדלת זמן שהיית המים בחצר על ידי ניתוק השטחים האטומים ממערכת הניקוז, ניתוב הנגר המתקבל משטחים אטומים אל שטחים חדירים, השארת מינימום של 15% שטח חדיר מסך שטח המגרש, שמירה על תכונות החלחול של אדמת הגן, ועוד. כמו כן בוצעה סקירה של מתקני החדרה

היכולים להגדיל את החלחול בחצרות בהן ישנן מגבלות אשר אינן מאפשרות את ביצוע ההמלצות. (כץ וחובריה, 2001)

עבודתם של שמיר וכרמון (1997) הכוללת התייחסות גם לעבודות הנ"ל סיפקה ידע בסיסי לפיתוח הנחיות לתכנון עירוני, המשמר את כמות ואיכות משאבי המים של ישראל. מחקר זה התמקד באקוויפר החוף בשל חשיבותו כמאגר המים הגדול בישראל ובשל חשיפתו לנזקים תוצרי פיתוח ובהיותו ממוקם מתחת מרכזי אוכלוסייה גדולים אשר צפויים להתרחב בעתיד. בין מסקנות המחקר נימצא כי הגידול באוכלוסייה ומגמת העיור הובילו להגדלת השטחים האטומים ולהקטנת יכולת ההתחדשות של האקוויפרים מתחת לשטחים אלו, ובכך מעלים את חשיבות התכנון הרגיש למים. אומדן הפסדי חלחול ממוצעים שנתיים עבור אקוויפר החוף בשנת 1990 היה 70 מלמ"ק, שערכם הכספי נע בין 15-45 מליון דולר. וכן הוערך כי אם תמשך מגמת העיור בצורת הפיתוח המקובלת בשנת פרסום הדו"ח, הרי שבשנת 2020 יעמוד ההפסד למי התהום על 150 מלמ"ק שערכם הכספי 30-100 מליון דולר (כרמון ושמיר, 1997).

עבודה נוספת בוצעה על ידי אנה לוין (2001) "תכנון עירוני רגיש למים: ניתוח חלופות להגדלת החלחול בשטחים עירוניים ציבוריים". עבודתה גיבשה עקרונות לתכנון שטחים ציבוריים פתוחים בעיר, ברמת המבנה והשכונה (רמת מזו), אשר יתרמו לצמצום ההשפעות השליליות של הפיתוח עירוני על כמות ואיכות מי התהום באקוויפר החוף. הנחת המחקר היא שתכנון של השטחים הציבוריים ושימוש באמצעים טכנולוגיים והנדסיים מתאימים בלבד יכולים להקטין את כמות הנגר העילי המצטבר ואת אבדן מי הנגר לאקוויפר. הושוו כמויות הנגר הנוצרות בשלוש חלופות תכנוניות על ידי שימוש במודל HMM.

החלופות היו:

- 1- ניקוז מקובל (שטח אטום מתנקז באופן ישיר למערכת הניקוז).
- 2 - חיבור של שטחים אטומים (גגות, שטח מרוצף) לשטחים חדירים (שטח פתוח).
- 3 - חיבור של שטחים אטומים למתקני החדרה (תעלה תת קרקעית)
- שילוב של חלופות 2 ו-3.

בעבודתם של בורמיל וחובריו (2003) בוצעו מדידות של איכות וכמות הנגר בנקודות שונות באגן ההיקוות בקריית גנים בראשון לציון - במוצא המרזב, המבנן והשכונה. בעזרת מדידות ספקיות ואיכות מי הנגר בנקודות שונות לאורך נתיב זרימת הנגר, ניסה המחקר לענות על שתי שאלות:

1. האם איכות הנגר העל קרקעי בשכונת מגורים ראויה להחזרה למי התהום?
2. כיצד משתנה איכות מי הנגר ככל שאלו מתקדמים במורד הזרימה?

נלקחו דגימות מי נגר בשש נקודות זמן בשלוש נקודות לאורך מסלול הניקוז השכונתי:

1. בפתחו של מרזב היורד מגג אחד הבניינים במבנן.
 2. בשוחת הניקוז המנקזת את המבנן.
 3. במוצא הניקוז השכונתי.
- בדגימות נבדקו 42 פרמטרים שונים של איכות מים; ביניהם נוכחות מתכות, מוצקים מרחפים, חנקות, pH, ועוד. ניתוח התוצאות כלל חמישה חלקים:

1. זיהוי אלו מבין 42 הפרמטרים שהינם בעלי ערך מדיד. רק 28 מתוך ה-42 הפרמטרים היו ניתנים למדידה ורק לחלק מאלו נמצאו נתונים להשוואה לסטנדרטים קיימים ולמדידות אחרות.
2. בדיקת הבדלים באיכות המים בזמנים שונים עבור אותה נקודה במרחב. נמצא כי ישנו טווח רחב של תוצאות עבור אותה נקודה.
3. בדיקת הבדלים באיכות המים עבור נקודות שונות במרחב עבור אותן נקודות זמן. לא נמצאה מגמה קבועה. לעיתים ריכוז המזהמים היה גדול יותר בנקודות היווצרות הנגר ולעיתים היה גדול יותר במורד.
4. השוואת תוצאות המדידה לתקן איכות השתייה על מנת לקבוע את כדאיות ההחזרה. במדידות שנלקחו נמצא כי מלבד ריכוזי עופרת בחלק מהדגימות, כל הפרמטרים הינם באיכות המאפשרת החזרת מי הנגר אל מי התהום. עם זאת נמנעו הכותבים, עקב מיעוט הדגימות והטווח הרחב של התוצאות, מלהציע מסקנה מגובשת לגבי כדאיות ההחזרה.
5. השוואת התוצאות לממצאים מחקריים רלבנטיים בישראל. תוצאות המדידה הושוו לערכים מדודים במי התהום ובמים המיועדים להחזרה. נמצא כי איכות מי הנגר עולה על אלו של מי התהום ושל המים המיועדים להחזרה אל מי התהום. כמו כן הושוו התוצאות למדידות שנעשו באשדוד ונמצאה התאמה בין התוצאות. (Asaf et al., 2004, , Dahan et. al, 2005, , ו- Yaara et al, 2007).

המסקנות אליהן הגיעו החוקרים הן כי איכות מי הנגר היוצאים משכונת נגר עירוני טיפוסית לישראל טובה יחסית ובהחלט מתאימה להחזרה למי התהום וכן לשימושים נוספים (עם הסתייגות הראויה לבדיקה נוספת לגבי עופרת במי הנגר).

מחקרים אלו התייחסו למישור החוף. האזור מאופיין בקרקע חולית וסלעי כורכר. עובי שכבת האקוויפר הולך וקטן ככל שמתקדמים מזרחה והוא בעל מוליכות הידראולית גבוהה יחסית, האופיינית לחול וכורכר. אגני היקוות במישור החוף מאופיינים בשיפוע מתון ובקרקע בעלת כושר מוליכות גבוה. (דוח נציבות המים, 2007).

חן חדד (2007) בעבודתה "נגר כמשאב בפיתוח הנוף העירוני" התמקדה במי נגר כמשאב נופי בסביבה העירונית ובמיוחד בשכונת המגורים, בחנה שכונה ברעננה אשר הייתה בשלבי פיתוח, אמדה את כמות הנגר אשר תכנון זה צפוי להפיק והציעה תוכנית חלופית אשר תשתמש בעודפי המים ותצמצם נגר. העבודה הובילה למסקנות הבאות:

התחשבות בשיקולים של ניהול נגר במסגרת תכנון הנוף בשכונות עירוניות, משפרת הן את הנוף השכונתי והן את מערך ניהול הנגר בשכונה. כמות המים המחלחלים הצפויים בתוכנית החלופית גדולה ב-60% ביחס לתוכנית המקורית, כמות מים זו מהווה הן חיסכון במים כמשאב והן תוספת חזותית, כתוצאה מחשיפת הנגר בברכות ותעלות הממוקמות בשטחים פתוחים ושיפור צמחיית הנוי בשכונה כתוצאה מהוספת מקור מים.

השינויים המומלצים בתהליך המקובל לתכנון הנוף בשכונות:

יש לצרף נתונים הקשורים בנגר למכלול הנתונים הסביבתיים והנופיים השונים באתר לפיהם יקבעו גודל ומיקום התכסיות הפנויות והבניות בשכונה.

כבר בשלב הכנת תוכנית השלד של השכונה יש לשלב מהנדס ניקוז ואדריכל נוף מתוך הבנה כי גם השטחים הפתוחים וגם הדרכים הינם חלק ממערך ניהול הנגר בשכונה.

בשלב הכנת הנספח הנופי לתב"ע (תוכנית בניין עיר), תכנון מתקנים ואמצעים לניהול נגר ישפיעו על תכנון השיפועים והגבהים העקרוניים בשטחים הפתוחים.

בשלב התכנון המפורט יש לעצב את מתקני ניהול הנגר כאלמנטים נופיים שישתלבו בעיצוב הכולל של השוהים הציבוריים הפתוחים.

המחקר הנוכחי נבנה על הידע אשר נאסף במחקרים אלו ומיישם אותו בשכונה מתוכננת בחיפה. השכונה ממוקמת בהרי הכרמל, אזור המאופיין בתנאים טופוגרפיים, מטאורולוגיים והידרולוגיים שונים מאלו הקיימים במישור החוף, כמתואר בפרק הבא.

3 שכונת זמר – מקרה בוחן

3.1 האתר הנבחר – שכונה בעיר חיפה

המחקר מתמקד בפיתוח עירוני באזור הכרמל בעיר חיפה, אזור בעל מאפיינים שונים ממישור החוף, שבו התמקדו התזות הקודמות שנעשו במסגרת המחקר בתחום תר"מ הן בטכניון והן על ידי חוקרים אחרים (גרתי וחובריו, 1993; נתיב וחובריה, 2002). גבעת זמר ממוקמת באזור הכרמל בעיר חיפה ובה מתוכננת הקמתה של שכונת מגורים.

הסיבות לבחירת גבעת זמר כמקרה בוחן:

- תנאי האזור שונים מאתרי מחקר קודמים בנושא תר"מ: השיפוע חד יחסית באזור המתוכנן לפיתוח, המחסור בשטח אינו מאפשר אגירה או החזרה בקנה מידה רחב, לא ידוע האם החזרה לקרקע ולמי התהום יכולה להביא תועלת, הגדלת נפחי נגר וספיקות במוצא מן השכונה עלול לגרום לנזקים במורד, כל אלה מציבים אתגר שונה בפני המתכנן הבוחן את הנזקים של פיתוח קונבנציונלי ואת התועלות של פיתוח תר"מ.
- האזור סמוך לשכונות מגורים בנויות, כאשר בו עצמו עוד לא חל פיתוח, ולכן ניתן להתרשם מהשפעות הפיתוח באזור ובמורדו על ידי התבוננות בשכונות הסמוכות אליה. להתרשם איכותית מבחינת חלוקת הגשם לנגר וחלחול.

3.1.1 מאפייני אזור המחקר

השכונה נמצאת בתחומי אגן נחל גיבורים (איורים 8 ו-10) שגבולותיו:

גבול דרום מערבי – רכס הכרמל, צומת דניה שדרות אבא חושי רום +390, מרכז חורב, שדרות מוריה, עד מרכז הכרמל +300. גבול מערבי – גבעת אורנים, ירידה ממרכז הכרמל לפי קו רכס מרום +300 עד רחוב החלוץ ברום +80. גבול מזרחי – מצמת דניה לאורך קו רכס עד מרכז שכומת זיו שדרות טומפלדור ברום +200. גבול צפון מערבי – שדרות טרומפלדור דרך רחוב התיכון רום +200 חוצה את תל עמל דרך רחוב גוש עציון ברום +80 עד נחל גיבורים.

מיקום וטופוגרפיה

גבעת זמר ממוקמת בחלקו המזרחי העליון של הכרמל (ר' איור 8). מבנה השכונה הוא של חצי סהר, תחומה ממזרח וממערב על ידי שני גאיות, מצפון על ידי כביש חנקין ומדרום על ידי שיא גובה (לא לגמרי נכון: התיחום הוא בטופוגרפיה ובכבישים המפרידים בין שטח השכונה לשטח שמעליו).

בשיא הגובה של שטח השכונה, 310 מטר מעל פני הים, ממוקם בית חולים פלימן. ממזרח אליו במרחק של כ-220 מטר מתחיל הגיא המזרחי אשר מתחיל בגובה של 260 מטר ומסתיים בגובה של 210 מטר. ממערב לשיא הגובה במרחק של כ-370 מטר מתחיל הגיא המערבי אשר מתחיל בגובה של 260 מטר ומסתיים בגובה של 220 מטר. אורכו של השטח הינו כ-740 מטר, רוחבו כ-360 מטר ושטחו (נמדד בתוכנת GIS הוא 229.6 דונם. בצידה המערבי של הגבעה השיפוע הינו כ- 22% ובצידה המזרחי כ- 13%.



איור 8 - מיקום גבעת זמר

Figure 8 – Givat Zemer's location

צומח מקומי טבעי

באזור קיים מגוון של צמחים הניתן לחלקם לשלוש קבוצות עיקריות המוצגות בטבלה 2. בנספח הנופי המצורף לתוכנית הפיתוח המאושרת מצוין בפרק 2.8 "הנחיות לתכנון צמחיה באזורים המיועדים לשיקום נופי" כי שיקום נופי לאחר פיתוח השכונה יכול ל"שתילה לכיסוי שטחים, שנחשפו עקב עבודות הפיתוח וכן עיבוי הצמחייה הקיימת" (נספח נופי, עיריית חיפה, 2009). למרות כוונת המתכננים לשקם את האזור לאחר הפיתוח ניתן להניח כי חלק גדול מהצומח המקומי יאבד.

עצים	שיחים	צמחי כיסוי ומטפסים
אורן הגלעין	אחירותם החורש	זלזלת מנוצה יערה איטלקית
אלון מצוי	אלה ארצישראלית	פואה מצויה

עצים	שיחים	צמחי כיסוי ומשפטים
חרוב	אלת המסטיק	קיסוס החורש
כליל החורש	אשחר רחב עלים	קיסוסית קוצנית
ער אציל	בר זית בינוני	
קטלב מצוי	מורן החורש	
שקד מצוי		
זית		
תאנה		

טבלה 2 - סוגי צמחיה נפוצים בגבעת זמר (נספח נופי, עיריית חיפה, 2009).

Table 2 – Common flora in Givat Zemer

גיאולוגיה

הקרקע הינה טרה רוסה רדודה ומאופיינת בעומק חתך של כחצי מטר עד מטר ומעמיקה באזור מורד הגאיות, יש נקודות שסלע האב חשוף (דן וחוברין, 1970).



תמונה 1 - חתך הקרקע במחשוף הצפוני בגבעת זמר (מכיוון דרך חנקין)

Picture 1 – Vertical section in exposed ground at the northern side of Givat Zemer (seen from Hankin Road)

מבחינים בשני בלוקים במורדות הכרמל הצפון מזרחי המופרדים על ידי העתק: מבנה צפוני של בלוק נווה שאנן- בין עין סעדיה לנמל חיפה ומבנה מזרחי של בלוק עוספיה – בין גבעת נשר ליגור.

מקור ההזנה של מי התהום בבלוק נווה שאנן הוא ממשקעים היורדים על מחשופי הדולומיט בבלוק. שטח המחשופים בבלוק נווה שאנן מחולק לשניים בהתאם לנטיית שכבות הדולומיט וההתפרסות של ההעתקים החוסמים או מטים את הזרימה של מי התהום: חלק צפון מזרחי גדול, מרכזי בשטח של 8 קמ"ר מעל לעין סעדיה המתנקז על המעיין. חלק קטן של המחשופים של 1.4 קמ"ר, צפון מערבית מנווה שאנן המתנקז ישירות אל הים. מרבית זרימת מי התהום של החלק המרכזי בבלוק נווה שאנן יוצאת במעיין עין סעדה בכמות של 1.848 מלמ"ש, הזרימה של החלק הקטן הינה 0.323 מלמ"ש (מובשוביץ, 2001). השכונה המתוכננת, גבעת זמר, ממוקמת מעל תא הכרמל המזרחי, צפון מערבית מנווה שאנן, מי התהום מאזור זה מתנקזים אל הים.

הידרולוגיה

באקוויפר הכרמל מובחנים שלושה תאים (איור 9): חוף הכרמל (אקוויפר החוף, תא 410), כרמל מערבי (תא 420) וכרמל מזרחי (תא 421). גבעת זמר ממוקמת מעל תא 421 - הכרמל המזרחי, אקוויפר חבורת יהודה – ניזון מגשם ומנוקז בשאיבה, זרימה לים, גרבן הקישון ועמק יזרעאל. ריכוז כלוריד של 135 מג"ל וללא מגמת עליה, 84% מהמים הנשאבים הם במליחות נמוכה מ-200 מגכ"ל. ריכוז החנקות נע בין 15-18 מג"ל. מפלס המים נע בין +4 לאפס מטר. השאיבה השנתית נעה בין 5 ל-10 מלמ"ק, שיעור ההפקה בשנת 2005/06 הייתה 8.2 מלמ"ק, בשנה זו ספיקת מעיינות עין סעדיה הייתה 4.6 מלמ"ק וריכוז הכלוריד במעיין היה כ-680 מג"ל כאשר המים ממעיין זה לא נוצלו (השרות ההידרולוגי, 2007). נתונים הידרולוגיים של תאים אלו מרוכזים בטבלה 3.

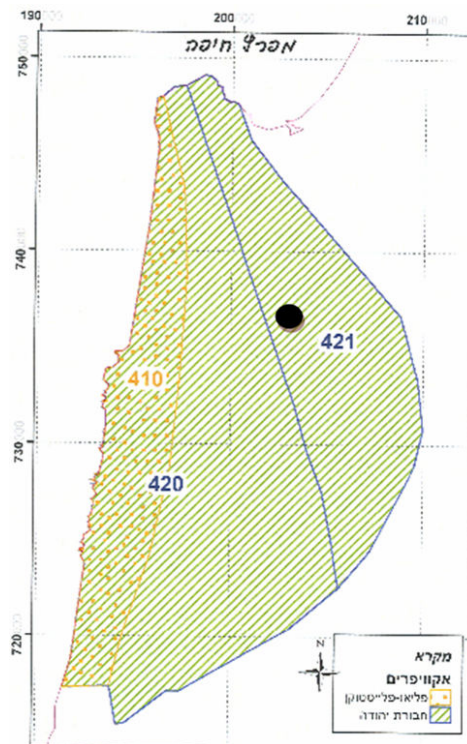
A – שטח מחשופים, השטחים אשר מהם יש העשרת מי תהום.

α – מקדם מילוי חוזר מגשם על פני שטח המחשופים, באחוזים מכמות הגשם.

שאיבות שנתיות [מלמ"ק]	מילוי גשם שנתי [מלמ"ק] (2005/06)	ממוצע גשם [מ"מ] (1970-2003)	α %	A [קמ"ר]	תא
¹ 19	7	600	14	80	410
8-12	18	600	19	158	420
5-10	16	550	26	117	421

טבלה 3 - נתוני מילוי ושאיבות מתאי האקוויפרים, השרות ההידרולוגי (2007)

Table 3 – Recharge and pumping data for Carmel aquifer cells (The Hydrologic Service, 2007)



איור 9 - תאי אקוויפר הכרמל (השרות ההידרולוגי, 2007). מיקום גבעת זמר מצוין בעיגול שחור

Figure 9 – Carmel Aquifer cells (The Hydrologic Service, 2007)

¹ מתוכם 11 להתפלה.

מתוך ראיון עם מרדכי מובשוביץ אשר ביצע סקר הידרולוגי על פוטנציאל ניצול האקוויפרים בשטחי עיריית חיפה נלמד כי מים המחלחלים בשטח אזור השכונה כנראה מגיעים בחלקם אל האקוויפר ועשויים להוות תוספת למשאבי המים הניתנים לניצול, אך לא ניתן לאשר קביעה זו (מובשוביץ, 2009).

ניקוז

גבעת זמר הינה חלק מאגן נחל גיבורים אשר שיטחו כ-9.5 קמ"ר ומחולק לחמישה תת-אגנים אשר מתנקזים דרך נחל גיבורים, זה בתורו מתנקז אל הים באזור העיר התחתית בחיפה בנקודה המסומנת באיור 10 בחץ כתום. גבעת זמר הצויה על ידי קו פרשת מים ושייכת לשני תת-אגנים, מסומנת בעיגול שחור באיור 10. במצבה הטבעי נגר הנוצר בה מתנקז לגאיות ממזרח וממערב לה. הנגר הזורם בגיא המזרחי ממשיך מנקודה מזרחית לרמת ספיר במקביל לדרך חנקין עד לאזור הגרנד קניון ומשם לאחד מיובליו של נחל גיבורים. הנגר הזורם בגיא המערבי של גבעת זמר ממשיך ממערב לרמת ספיר ומתנקז לנחל גיבורים בנקודת המפגש של שלושה תת-האגנים.

אגן נחל גיבורים ממוקם ביחידה המרכזית ההררית, אחת משלוש יחידות טופוגרפיות באזור חיפה: יחידה מרכזית הררית – רכס הכרמל, שבה מתרכזים אזורי מסחר ומגורים. היחידה ההררית מחולקת לשלושה מפלסים טופוגרפיים:

מפלס תחתון של מישור החוף – מפרץ חיפה עם העיר התחתית והנמל ובו נמצא המרכז העסקי-משרדי של העיר, שכונות מגורים, בתי מלון, אזורי היי-טק.

מפלס עליון - הנמצא על רכס הכרמל ובו קיימים רובעי מגורים, מרכזי קניות, בתי מלון ואוניברסיטת חיפה. פרשת המים שעוברת בשיא של רכס הכרמל גורמת לאי סימטריות באופי ובאורך היחסי של הנחלים.

מפלס ביניים - שבו נמצא אזור הדר הכרמל ונווה שאנן, אזור מסחר ומגורים הכולל גם את הטכניון. גבעת זמר נמצאת באזור זה, ניתן לראותה באיור 9 שבה מופיעה העיר חיפה, מיקום השכונה מצוין בדגל אדום. נגר הנוצר במפלס זה, כאשר קצב זרימתו עולה על יכולת הניקוז של מוביליו, יוצר הצפות קשות באזורי העיר התחתית, אזור גשר פז ושכונת נווה שאנן, דוגמא להצפה כזו ניתן לראות בתמונה 2 אשר צולמה בסמוך לגשר פז בתאריך 01/11/09.



איור 10 - אגן נחל גיבורים, מקור: אברי ליבנה מחברת "פלגי מים"

Figure 10 – Giborim Brook Basin (from Avri Livneh, Palgei Mayim)

יחידה צפונית

כוללת את עמק זבולון, ומישור החוף על כיסוי של דיונות חול, בצפון שטחי העיר, אזור מישורי המוקדש ברובו לתעשייה ומסחר.

מישור העמק כולל את רצועת דיונות חול משתרעות במקביל לחוף הים מנחל הקישון בדרום ועד לשפך הנעמן בצפון. רוחב היחידה כ-2.5 ק"מ. רום מכסימלי של הדיונות בשטחי חיפה מגיע ל- +8 מטר.

שטחי מישור עמק זבולון הבנויים משכבות אלוביאליות של טין וחרסית משתרעים בכיוון מזרח-מערב בין הדיונות במערב ועד למרגלות גבעות קריית אתא ושפרעם (בקטע הדרומי של עמק זבולון).

שטחי המישור מכוסים בשכבות חרסית. פני השטח המישורי מתרוממים במתינות כלפי מזרח.



תמונה 2 - כביש מוצף בסמוך לגשר פז בתאריך 01/11/09

Picture 2 – A flooded road near Paz Bridge, taken on 01/11/09

המישור שרוחבו כ-5.5 ק"מ (בקטע של קריית אתא – קריית חיים) נחסם כלפי מזרח בגבעות של קריית אתא ושפרעם. בקטע הדרומי של עמק זבולון בין נמל קישון ולמרגלות הגבעות של איבטין - כפר חסידים רוחב מישור העמק מגיע לכ-9 ק"מ.

ניקוז שטחי העיר שבתחומי עמק זבולון הוא על ידי נחל קישון ויובליו כמו נחל גדורה מצפון מזרח ונחל ציפורי שנשפך לקישון סמוך למפעל דשנים. הנגר הנוצר ביחידה זו מתנקז אל הים כאשר חלקו מתועל על ידי נחל הקישון.

יחידה דרומית – מישור החוף בין הים למרגלות הכרמל בדרום מערב העיר. מישור החוף שרוחבו כ-1.5 ק"מ ואורכו 4 ק"מ ולו צורה של משולש צר שנעלם לכיוון מפגש הים עם "חוטם הכרמל". ביחידה

נמצאים אזורי מגורים, נופש ותעשיית היי-טק. הנגר אשר מתקבל ממעלה הכרמל וזה הנוצר ביחידה, זורם מערבה על הים.

3.2 תוכנית פיתוח מאושרת

במהלך עבודת התזה עיריית חיפה הביאה לידי אישור תוכניות פיתוח שונות בגבעת זמר אשר ביטלו התוכניות קודמות להן. ההתייחסות בעבודה זו לתוכניות הינה על פי הסדר הבא:

- תוכנית 1

התוכנית המאושרת הראשונה, אושרה בעירייה בתאריך 17.09.2001, התקבלה מהעירייה ביוני 2008.

במהלך העבודה תיקרא חלופה 1.

- תוכנית 2

התקבלה ביחד עם תוכנית 1, אך נכון לתאריך בו התקבלה מהעירייה הוגדרה כ"תוכנית מוצעת". בתוכנית זו לא היו שינויים משמעותיים באחוז שימושי הקרקע השונים ביחס לתוכנית 1, אלא בפזורם במרחב.

- תוכנית 3

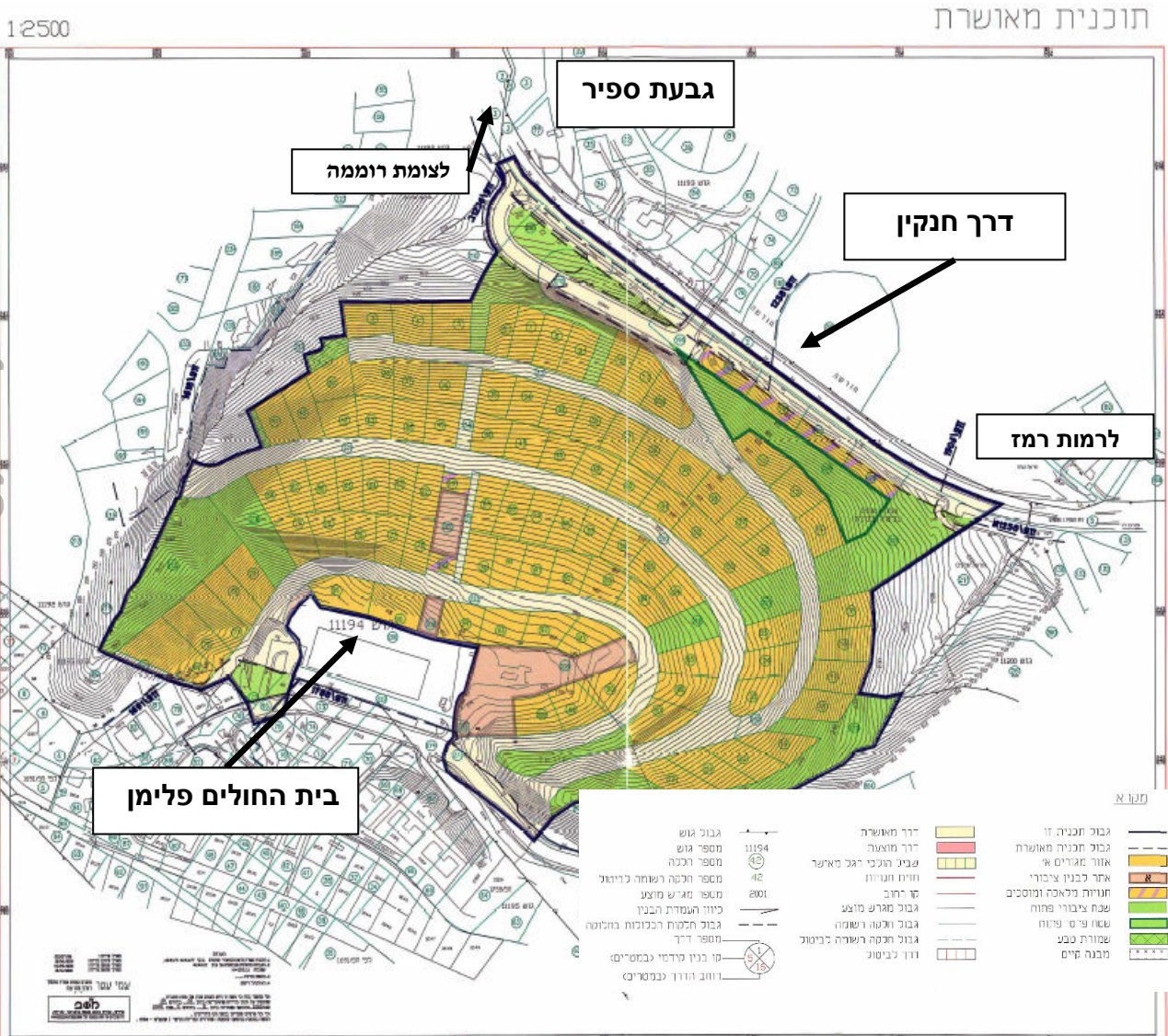
תוכנית הפיתוח המופקדת בעירייה ונמצאת בתהליכי אישור.

- תוכנית 4

תוכנית פיתוח חלופית אשר מוצעת בעבודה זו ועליה יפורט בהרחבה בפרק 5, תוכנית זו תיקרא "התוכנית המוצעת" או חלופה 2 בגוף העבודה.

עבודה זו מתייחסת לתוכנית המאושרת הראשונה אשר התקבלה מהעירייה, תוכנית 1 אשר תיקרא במהלך העבודה כ"התוכנית המאושרת", בלבד מבלי להתייחס לתוכניות הפיתוח אשר אושרו מאז ולשינויים נוספים אשר עלולים להתקבל בעתיד.

כיום ישנה תוכנית מאושרת לפיתוח בגבעת זמר, פיתוח האזור יכלול בנייתה של שכונת מגורים אשר יכלול 124 מגרשי מגורים בהם יבנו 848 יחידות דיור. באיור 11 מובאת תוכנית הבנייה המאושרת כפי שהתקבלה מעיריית חיפה.



איור 11 - תוכנית הפיתוח המאושרת (התקבלה ממחלקת ההנדסה של חיפה בתאריך 06/06/08)

Figure 11 – Approved Development Plan (From The Haifa Engineering Department 06/06/2008)

בטבלה 4 מובאים נתוני השימושי הקרקע בתוכנית המאושרת (חלופה 1). ניתן לראות מתוך איור 11 כי המתכננים ריכזו את הבניינים הציבוריים במעלה וכי חלק גדול מהשטחים המיועדים לחנויות מלאכה ומוסכים (המונה "מוסכים" כלול במקרא, אם כי לא סביר שיהיו מוסכים בשכונה) ממוקמים במורד

הגבעה. המגרשים המיועדים למגורים מפוזרים לאורך המורד בצורה אחידה. המונח "פוליגונים" בטבלה משמעו הגדרת החלקות בתוכנית ממ"ג).

סוג תכנית	מספר חלקות ("פוליגונים")	סך שטח [דונם]	אחוזים
בניין ציבורי	4	8.06	3.51
חנויות מלאכה ומוסכים	3	3.11	1.35
אזור טבעי	2	22.96	10.00
כביש	8	52.31	22.78
מגורים	94	103.53	45.08
שטחים ציבוריים פתוחים (שצ"פים)	13	39.67	17.28
סך	124	229.64	100.00

טבלה 4: שימושי הקרקע בתכנית המאושרת (חלופה 1)

Table 4 – Land uses in approved developing plan

מתוך השטח של המגרשים מסוג מגורים, בניינים ציבוריים וחנויות מלאכה ומוסכים רק 85% מאושרים לפיתוח. אל השטחים בחלקות אשר לא יפותחו והשפעתם על כלל המגרש נתייחס בהרחבה בפרק 5.

3.3 נזקים פוטנציאליים כתוצאה מפיתוח שכונה, באגן ובמורדו

באם נתייחס אל סוג התכנית שצ"פ כחדיר עם השטח המיועד להישאר כטבעי מתקבל כי סה"כ השטח החדיר מהווה כ-27% מסך שטח האגן, כך שעל פי התוכנית המאושרת כ-73% משטח האגן יומר בתכניות בעלות יכולת החדרה נמוכה ביחס לשטח מקורי. המרת שטחים טבעיים בעלי אופי חדיר בשטחים בעלי יכולת החדרה נמוכה, כפי שהוסבר בפרק 2, גורמים לעלייה בנפח הנגר וספיקתו הנוצרים בעקבות אירוע גשם. שינויים אלו במשטר ההידרולוגי באזור יכולים לגרום לנזקים הן בתחומי האגן והן במורדו:

נזקים הידרולוגיים

הנגר הנוצר בגבעת זמר, המתנקז לנחל גיבורים, ישחרר נפחי מים גדולים יותר בזרימות חזקות יותר למורד, הספיקות הגבוהות אשר יתקבלו בגאיות לאחר פיתוח יהיו בעלי כוחות גזירה חזקים יותר, ויגרמו לבלייה מואצת של הטופוגרפיה, קרקע ומסלע. בנוסף לנזק לגאיות ייתכן נזק למערכת הניקוז במורד אגן ההיקוות כאשר אדמת הסחף החדשה שתיווצר עלולה לגרום לשיקוע וסתימות במערכות הניקוז אשר לא תוכננה לעמוד בספיקות אלו. בנוסף לעלייה בספיקות השיא, תתקבל עלייה בנפחי מי הנגר הנוצרים בגבעת זמר, מים אלו אשר טרם הפיתוח חלחלו והעשירו את האקוויפר, יאבדו אם ינותבו למערכת הניקוז ומשם לים.

פיתוח אזור טבעי עלול להוביל לירידה באיכות מי הנגר כתוצאה מנוכחות מזהמים, כפי שהוסבר בפרק 2. בדגימות מים שנאספו בגבעת זמר במצבה הטבעי ובסמוך לה בנקודת ניקוז של שכונה בנויה בעלת גודל אגן דומה בתאריך 22/02/09 נמדדו ריכוזי 27 יסודות שונים, מזהמים אורגנים ורמת pH המהווים פרמטרים של איכות מי נגר, בהתאם לפרמטרים שנמדדו בעבודה על שכונת קרית גנים בראשון לציון (בורמיל וחובריו 2003). תוצאות המדידות לא הראו ריכוזי מזהמים גבוהים יותר במי הנגר שנאספו באזור המפותח ביחס לאזור הטבעי. כיוון שנערכה סדרת מדידות אחת בלבד לא ניתן להסיק מכך על השפעות הפיתוח על איכות המים אך בחרנו להימנע מלהתייחס אל נזק פוטנציאלי זה.

נזקים אקולוגיים

הספיקה המוגברת תיצור זרימה חזקה העלולה לשנות את תוואי הזרימה כתוצאה משחיקה והרחבה של דפנות הנחלים הקיימים ועקירת צמחים אשר בית השורשים שלהם אינו מותאם לספיקות החדשות. דוגמא לתופעה זו ניתן לראות בתמונה 3 אשר צולמה בנחל גיבורים, ניתן לראות בצידה הימנית של התמונה גזע עץ על גדות הנחל שנפל כתוצאה מהסעת האדמה אליה שורשיו היו מחוברים, התמונה צולמה ב-18 בדצמבר 2009 בנקודת החיבור של שלושת תתי האגנים העליונים של אגן נחל גיבורים. יש לצפות כי נזקים כאלה עלולים להתגבר לאחר הבניה.

נזקים כלכליים

פיתוח גבעת זמר עלול להוביל ליצירת הנזקים האקולוגיים וההידרולוגיים במורד מהשכונה המתוכננת אשר תוארו בסעיפים הקודמים, לנזקים אלו ישנו ביטוי כלכלי הבא לידי ביטוי בפגיעה במערכות הניקוז ופגיעה בערכי נוף. דוגמא לנזק במערכות הניקוז ניתן לראות בתמונה 4 אשר צולמה ב-18 בדצמבר 2009, בתמונה אשר צולמה כקילומטר במורד מנקודת המפגש של שלושת תת-האגנים באגן נחל גיבורים ניתן לראות מוביל מים אשר נסתם עקב שקיעה של קרקע וסלעים שונים אשר נעקרו ממקומם כתוצאה מכוחות גזירה אשר חרגו מהערכים אשר על פיהם נקבע גודל המוביל.

נזק כלכלי נוסף מתקבל מהצפות במורד אשר שכיחותן והיקפן עלולים לגדול ככל שגדלים נפח המים וספיקתם. כמו כן החלפת החורשה הטבעית במבנים וכבישים פוגמת באיכות החיים, פעולה אשר השפעתה נמדדת ביותר מנזק כלכלי גרדה וכימותה קשה יותר.

עלות נוספת כתוצאה מהפיתוח הינה הצורך למערכת ניקוז בעלת עלות גבוהה בשכונה עצמה, ככל שתיווצר ספיקה רבה יותר כך יהיה צורך במערכת ניקוז רחבה יותר אשר תוכל להתמודד עימה.



תמונות 3 ו-4 - נזקים בנחל גיבורים כתוצאה מספיקות גבוהות. תמונה 4 צולמה בנקודת המפגש של שלושת תת-האגנים העליונים של נחל גיבורים ותמונה 3 צולמה כקילומטר במורד מנקודה זו.

Pictures 3 and 4 – Damage in Giborim Brook Basin resulting from high flow rates

3.4 חלופות תכנון אפשריות בגבעת זמר

לאחר שנלמדו מאפייני האתר המיועד לפיתוח והנזקים שפיתוח זה עלול לגרום, יש לבדוק אלו יתרונות יתקבלו מיישום תר"מ. הערכת התועלת של פיתוח תר"מ"י בשכונה יתמקד בצמצום נפחי הנגר וצמצום ספיקות השיא במוצא מן השכונה, למרות שת"מ שואף לצמצם גם פגיעה באיכות המים אך לא ניתן בעבודה הנוכחית להתייחס לנושא זה בשל חוסר יכולת לקבוע את השפעת אופי התכנון על משתנה זה.

בהתאם לכך נבנו מספר חלופות תכנון על פי שני קווים מנחים:

- סך השטח המפותח הינו זהה בכולן.
- סך גודל השטח של כל התכסיות בעלות יכולת חדירות גבוהה (שטח טבעי ו-שצ"פ) וכל התכסיות בעלות יכולת חדירות נמוכה (מגורים, בניין ציבורי, כביש וחנויות מלאכה ומוסכים) ישמר עבור כל חלופה אך אופן סידורם במרחב יהיה שונה.

החלופות המנותחות הינן:

- 1- התכנית המאושרת, כמות שהיא;
 - 1א - התוכנית המאושרת לאחר שהוספו לה מתקני ניהול נגר;
 - 2- תוכנית מוצעת, אשר ארגון השטחים בתוכה נעשה בהתאם להנחיות תר"מ;
 - 2א - תוכנית מוצעת המשולבת עם מתקני ניהול נגר.
- על מנת למצוא אילו אמצעים ניתן ליישם ואת התועלות שניתן יהיה להפיק מיישומם יש תחילה לכמת את ההשפעות ההידרולוגיות של כל חלופה, נפח מי הנגר אשר יתווספו והעלייה בספיקת השיא כתוצאה מפיתוח זה. לצורך כך נבחרו מספר דרכי חישוב אשר טבען יפורט בפרק 4 - נוהל המחקר וכליו. תוצאות החישובים ידונו בפרק 5 – יישום בגבעת זמר: תכנון קיים ותכנון חלופי, ומן התוצאות תוסקנה מסקנות.

4 נוהל המחקר וכליו

על מנת להגשים את מטרת המחקר, שהיא בחינת ההשפעות והתועלות של יישום עקרונות ואמצעי תר"מ לניהול הנגר בשכונת מגורים מתוכננת, יש להגדיר את המשתנים התוצאתיים – ספיקות ונפחים – אשר יחושבו עבור תכניות הפיתוח המאושרת והמוצעת, להשוות באמצעותם בין תכניות אלה, ולהסיק מן ההשוואה על השפעת ותועלת התכנון התר"מ. משתנים אלה צריכים להיות, מחד, משמעותיים להערכת התועלות של תכנון תר"מ, ומאידך להיות ניתנים לחישוב עם הנתונים שניתן להשיג ולעבד עבור השכונה שנבחרה.

המשתנים הרלבנטיים הם: (א) נפחי הנגר במוצא השכונה מכל סופה ובסיכום שנתי, (ב) ספיקות השיא שישמשו לתכנון המערכות לניהול הנגר בשכונה עצמה ובמוצא ממנה, כלומר כושר ההלכה (למשל: קטרי הצינורות) של מערכת הנקזים ונפחי אגירה (אם יהיו כאלה) המשמשים למיתון הספיקות במוצא, ו- (ג) איכות מי הנגר במוצא מן השכונה.

עבודה זו מתייחסת לנפחים וספיקות, כפי שיתואר בהמשך פרק זה. אין בידינו נתונים על איכות מי הנגר הזורמים כיום בשטח המיועד לשכונה (אם כי נלקחו ונותחו כמה דוגמות מי נגר בעת סופת גשם, ראה התייחסות לנושא בתת פרק 3.2.1) וכמו כן אין לנו יכולת לחשב את השפעת הפיתוח במתכונות שונות (כלומר, על פי התכנונים השונים) על איכות מי הנגר. עם זאת, לאחר ביצוע החישובים ההידרולוגיים (נפחים וספיקות) ולאור תיאור הפיתוח בחלופה המוצעת, ניתן יהיה להביע דעה באשר לשיפור באיכות מי הנגר בחלופה המוצעת יחסית המאושרת עקב שינויים במהירויות הזרימה ובמיוחד עקב העברת הנגר דרך אזורי צמחיה ומתקני השהייה.

פרק זה יעסוק במשתנים אלו ובשיטות החישוב אשר נבחרו לאמוד את ערכיהם בתוכניות הפיתוח המשוות זו לזו.

4.1 בחירת המשתנים המתארים את ההתנהגות ההידרולוגית של האגן והכלים

לחישוב

על מנת להשוות בין תוכניות הפיתוח השונות נבחרו שני משתנים, ספיקת שיא ונפח נגר הנוצרים בעקבות אירוע גשם, פרק זה יעסוק במודלים ההידרולוגיים אשר נבחרו לצורך השוואה זו, בשיטות אשר יושמו ובכלים אשר נעשה בהם שימוש.

נפח הנגר הנוצר יחושב עבור ערכי עובי גשם המייצגים סופות אפשריות באזור זה בעובי שונה. תחום העובי של סופות באזור זה נלקח מאתר האינטרנט של השירות המטאורולוגי עבור תחנת נמל חיפה בשל

היותה התחנה הקרובה ביותר לגבעת זמר ובשל טווח זמן הנתונים הארוך אשר נאספו בה מ-1952. עובי הגשם השנתי הממוצע בתחנה זו הוא 540 מ"מ.

על מנת לקבל נפח שנתי מצטבר נעשה שימוש בנתוני גשמים של שלוש שנים, 2001-2002 עד 2003-2004.

חישוב ספיקת השיא תעשה בהתבסס על נתונים מעובדים מתחנת המדידה בנמל חיפה, שהצטברו במשך כ-50 שנה ומתוכם נבנו עקומי משך-עוצמה-הסתברות אשר יוצגו בהמשך.

המודל אשר נבחר לחישוב נפחי הנגר במוצא הינו המודל TR-55 (US Soil Conservation Service, 1986), השימוש במודל נבחן בצורתו המקורית ובשתי ואריאציות נוספות של חישוב הנגר, המודל וואריאציות החישוב ידונו בהמשך.

לצורך חישוב ספיקת השיא נבחרה השיטה הרציונלית ונבנתה הידרוגרמה על פי שיטת הידרוגרמת היחידה (Sherman, 1932), שיטות אלו יפורטו בהמשך.

כיוון שכל המודלים אשר נבחרו מצריכים הזנת נתונים גיאוגרפים המאפיינים את האגן, כגון גודל שטחים, שיפועים וגבהים הוחלט להשתמש בכלי ממ"ג.

4.2 מערכות מידע גיאוגרפיות – ממ"ג

מערכת מידע גיאוגרפית (ממ"ג או GIS) הינה מערכת מבוססת-מחשב, הכוללת כלים משולבים, שמטרתם עיבוד (אחסון, אחזור, יצירה, ניתוח והצגה) של מידע, תוך שימוש במידע מפורש הקיים עבור מיקומו על-פני כדור-הארץ, עבור תהליכים הדורשים ניהול, החלטות ומדע.

ניתן בתוכנה זו להציג שכבות מידע שונות בנפרד או במקביל בכל קנה מידה ועל ידי כך לקבל ייצוג גרפי ברמת מורכבות שונה עבור הנושא הנבדק. בממ"ג ישנם שני סוגי שכבות מידע, שכבות רסטוריות ושכבות וקטוריות. מידע שכבה רסטורית (סיביות) – מתאר תמונה המוצגת באמצעות מפה של סיביות, לדוגמא, תמונה. לכל תא במפה/תמונה יש ערך מספרי, שלרוב מציין מידע צבע/רוויה של אותו סיב. מידע שכבה וקטורית – הצגת תמונה באמצעות וקטורים ופונקציות מתמטיות מובנות: מיקום תחילי ומיקום סיום (או מיקום תחילי, כוון וגודל), וכן ערכים של צבע, עובי ועוד. שלושה סוגים של גיאומטריה וקטורית: נקודה (צומת): עצים, שוחות ביוב, עמודי תאורה...; קו-ישר/עקום: רחובות, כבישים, נחלים...; פוליגון: מבנים, גושים, חלקות, ערים...

יתרונות הממ"ג הינם (Burrough et al, 1998):

- יתרון בהדגשה, כימות והבנת היקף תופעות מרחביות מורכבות. בעבודה זו, השימוש בממ"ג איפשר בין היתר התבוננות בגבעת זמר בקני מידה שונים, ביחס לתתי-האגנים, לאגן נחל גיבורים ולכלל הכרמל ובכך תרם להבנת השפעות הפיתוח של גבעת זמר על נקודות שונות במורד.
- יצירת אמת מידה להערכת הפרמטרים הנבדקים ולקנה המידה המתאים, זאת בזכות פישוט מורכבות התופעות המרחביות. על ידי כימות סך שטח התכסיות השונות בתוכנית המאושרת ניתן היה ליצור חלופות פיתוח בעלות פיזור תכסיות שונה אך סך שטח דומה, ובכך לבדוד את השפעת הפיזור על נפח וספיקת הנגר המתקבלים בשכונה.
- פשטות העלאת חלופות למקבלי ההחלטות, על ידי יצירת מטריצה המדגישה ניגודים או מצבים תואמים והפעלת כלים של ניתוח רב משתני. כאשר שולבו מספר שכבות מידע התקבלה מטריצה בה לכל מגרש ישנו ערך של גובה, דבר האפשר יצירת רשת זרימה עבור כל חלופה ובסופו של דבר השוואה ביניהן.

4.2.1 יישום ממ"ג בשכונת זמר

תחילה הוזנה תוכנית הפיתוח המאושרת לתוך התוכנה כשכבה רסטורית של תמונה של מפה אשר התקבלה מעיריית חיפה, איור 11. בתמונת זו מסומנים שימושי הקרקע השונים באמצעות צבעים, המוסברים באמצעות מקרא מצורף, וסרטוט של קווי גובה אשר מהם ניתן לשייך לכל נקודה ערך של גובה מעל פני הים.

לאחר הזנת יצירת שכבת תמונת הפיתוח המאושרת נבנתה שיכבה ווקטורית בהתאם לשכבה הראשונה אשר הורכבה מהיקף האזור המתוכנן לבנייה, שיכבה זו שימשה במהלך בנייתן של התוכניות החלופיות כך שסך השטח המפותח בכל התוכניות הינו זהה.

לתוך שכבת ההיקף הוספו פוליגונים של חלוקת השטח לשימושים שונים (מגרשי מגורים, שטחים ציבוריים פתוחים, כבישים, וכו') על רקע שכבת תמונת הפיתוח ובהתאם לה, כך שהתקבלה שכבת פוליגונים ווקטורית המייצגת את תוכנית הפיתוח המוצעת. באמצעות תוכנת הממ"ג יוחסו לכל פוליגון ערכים של שטח, וסוג התכסית אשר יותר מאוחר שימש בהערכת ערך ה-CN כפי שיפורט בהמשך.

שכבה זו הותאמה לרשת הקואורדינטות של ישראל, פעולה זו איפשרה את שילובה עם שכבות נוספות התואמות קואורדינטות אלו בצורה מדויקת, והוספו שתי שכבות נוספות, שכבת ווקטורית של קווי גובה ברזולוציה של 5 מטר ובשכבת רסטורית תמונה של העיר חיפה, כך שבסופו של דבר התקבלה שכבה המייצגת את תוכנית הפיתוח ביחס למיקומה האמיתי בעיר חיפה. על ידי ייצוג בקני מידה שונים ניתן

לראות את מיקום השכונה המתוכננת באגן ההיקוות בו היא נמצאת, אגן נחל גיבורים, מיקומה ביחס לאקוויפרי הכרמל או בכל שיכבה או מפה המותאמת לקואורדינאטות ישראל.

על ידי הצלבת שכבת קווי הגובה עם שכבת הפוליגונים של תוכניות הפיתוח השונות נוספו שני ערכים לפוליגונים, ערך גובה מקסימאלי וערך גובה מינימאלי אשר התקבלו מערכי קווי הגובה אשר חתכו כל פוליגון. מתוך ערכי הגובה של הפוליגונים השונים נקבעו כיווני זרימת הנגר בין פוליגונים סמוכים. חלופות התכנון הנוספות נבנו במתכונת דומה באמצעות התוכנה, מתוך התחשבות במספר שיקולים אשר יפורטו בהרחבה בפרק 5.

המידע אשר חולץ לצורך שימוש במודל SCS על ידי שימוש בתוכנת GIS עבור חלופות התכנון השונות כולל את שטחי התכסיות השונות ופריסתן במרחב וכחלק מרשת הידרולוגית. המידע אשר חולץ מתוך שימוש בתוכנה לצורך חישוב ספיקות השיא הינו נתיב הזרימה הארוך ביותר של הנגר ושיפועו.

4.3 מודלים לחישוב נפחי נגר

לחישוב נפח הנגר הנוצר בכל אירוע גשם (סופה או יממה, ר' להלן) נבחר מודל SCS, שפותח ע"י השירות לשימור הקרקע בארה"ב (US Soil Conservation Service, 1975 & 1985, Hawkins et al, 2009).

החישובים נעשו בתחילה בהתאם לשיטת החישוב המקורית של המודל, בה מחשבים מקדם נפח נגר משוקלל של ערכי המקדם של שטחי המשנה באגן, כל אחד על פי חלקו בשטח הכולל. בנוסף נעשו החישובים גם על פי שיטת חישוב אשר הציעו שמיר וכרמון (1997) בה סוכמים את הנגר הנוצר מכל סוג תכסית בנפרד ומחשבים את הנגר הכולל כשקלול (שוב, על פי השטח החלקי) של תרומות חלקי האגן. בנוסף, פותחה בעבודה הנוכחית שיטת חישוב של מודל מבוזר בה הנגר הנוצר מכל פוליגון מועבר אל הפוליגון (או פוליגונים) הנמצאים במורד ממנו (סעיף 4.3.2). העברת הנגר נעשית ע"י חלוקת כמות (נפח) הנגר היוצא מן הפוליגון העליון בשטח הפוליגון המקבל, כך שהתוצאה הינה בעובי (מ"מ) של תוספת מים זו, המתווספת לגשם היורד על גבי הפוליגון המקבל (כאילו הייתה גם היא גשם על שטח זה) וערך הנגר היוצא מן הפוליגון הזה מחושב על פי העובי הכולל - גשם על הפוליגון ועוד הנגר המעלי מחולק לשטח הפוליגון. כך נוצרת "רשת זרימה" בכל שטח התכנית. המודל המבוזר ייקרא DSCS – Distributed SCS.

מודל SCS מאפשר גם לחשב את ספיקת השיא בכל אירוע נגר, תוך שימוש בנוסחאות אמפיריות או נומוגרמות המבוססות אף הן על נתונים מארצות הברית. עם זאת, הוחלט לא להשתמש בחישוב ספיקת השיא על פי שיטת SCS אלא להשתמש בנוסחה הרציונלית, המקובלת יותר בארץ לחישוב ספיקת השיא. על כך יפורט בהמשך.

4.3.1 מודל SCS

שיטת SCS פותחה על סמך נתונים מדודים בארה"ב, לאחר ביצוע מספר רב של חישובים על נתוני מדודים של גשמי סופות וזרימות הנגר התוצאתיות. התוצאות מבוטאות בנוסחה, בטבלאות של מקדמים על פי סוג התכסית, ובנומוגרמות, אשר רוכזו בספר ההדרכה TR-55. המהדורה המקורית היא משנת 1975 ומהדורה מעודכנת משנת 1986 (SCS TR-55, 1975, 1986). ראוי לציין כי למרות שהשיטה זכתה גם לביקורת היא נותרה בשימוש ומומלצת עד היום על ידי הגורמים המקצועיים בארה"ב Prince George's County, 1999. Hawkins et al, 2009. Clar et al, 2007) ללא הבחנה בין אזורים אקלימיים והידרולוגיים בארצות הברית. מכאן ניתן להסיק כי סביר להשתמש בה גם בתנאים שלנו, תוך שימוש במקדמי CN המתאימים לסוגי הקרקע והתכסיות באתר המתוכנן.

$$(4.1) \quad \text{המודל נתון במשוואה:} \quad Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)}$$

המשוואה תקפה רק עבור $Q > 0$, כאשר:

P – עובי הגשם בסופה, ואם אין נתוני סופות מותר להשתמש בנתונים ימתיים [מ"מ].

Q – עובי הנגר המחושב לסופה או ליממה [מ"מ].

I_a – הפסדים מהגשם טרם תחילת יצירת הנגר [מ"מ].

S – השהיית מים פוטנציאלית מקסימאלית [מ"מ].

כל הערכים מבוטאים ביחידות של עובי. במקור היו היחידות באינצ'ים, ואילו אנו משתמשים בערכים במ"מ, כאשר המרת היחידות תידון בהמשך (ראה משוואה 4.4). ניתוח הנתונים של השירות האמריקני לשימור הקרקע הוליך לקשר האמפירי:

$$(4.2) \quad I_a = 0.2S$$

מהצבה של קשר זה ב-(4.1) מתקבל:

$$(4.3) \quad Q = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} & P > 0.2S \\ 0 & P \leq 0.2S \end{cases}$$

על מנת להמיר את הנפח המתקבל ביחידות של מ"מ, Q , ליחידות של נפח, מטר מעוקב, יש לכפול את הערך Q בשטח האגן A , המבוטא ביחידות של דונם.

הפרמטר S מייצג את השהיית המים באגן והוא תלוי בתכונות הפיסיקליות של האגן: סוג הקרקע המבטא את חדירותה, תכסית הקרקע המבטאת את מידת האיטום, ורטיבות הקרקע בתחילת הסופה. לכל סוג קרקע, תכסית ורטיבות תחילית הוגדר מקדם לנפח הנגר הנקרא CN = Curve Number.

יש לבחור את אופי הקרקע המייצגת את האזור, המודל ממין את סוגי הקרקע לארבע "קבוצות הידרולוגיות", על פי רמת החדירות:

- קרקע מסוג A – בעלת פוטנציאל נמוך ליצירת נגר: קצב החדור המים מהיר וגבוה מ-7.6 מ"מ לשעה.
- קרקע מסוג B – בעלת פוטנציאל בינוני ליצירת נגר: קצב החדור המים נע בין 3.8 ל-7.6 מ"מ לשעה.
- קרקע מסוג C – בעלת פוטנציאל בינוני עד גבוה ליצירת נגר: קצב החדור נע בין 1.3 ל-3.8 מ"מ לשעה.
- קרקע מסוג D – בעלת פוטנציאל גבוה ליצירת נגר; קצב החדור המים נע בין 0 ל-1.3 מ"מ לשעה. דוגמא לסדרי גודל של קצבי חדור בקרקעות שונות בארץ ניתן לראות בטבלה 5.

סוג קרקע	מוליכות מים [מ"מ/שעה]
חמרה 4% חרסית	553 (עם סטיית תקן גדולה)
חמרה 22% חרסית	82
חמרה 36% חרסית	17
לס	15
חומה כהה	28
רנזדינה 23% חרסית	29
רנזדינה 31% חרסית	9

טבלה 5 - מוליכות הידרולית של קרקעות ברוויה (כרמון ושמיר, 1997, עמ' 163, מעמוס הדס)

Table 5 - Infiltration rates of saturated soils (Carmon and Shamir, 1997, p. 163, from Amos Hadas, Agricultural Research Service)

ערכי CN מושפעים מרטיבות הקרקע ברגע תחילת הגשם. הוגדרו שלושה מצבי רטיבות: AMS-1, AMS-2, AMS-3. הראשון מייצג רמת רטיבות נמוכה והאחרון גבוהה. היות ולא ניתן לחזות מראש מה תהיה רטיבות הקרקע בסופות עתידיות, והיות ורטיבות זו צפויה להשתנות בין הסופות, מקובל לקחת בחשבון לצרכי חישוב של שטחים מתוכננים עתידיים את הערך הממוצע AMS-2 שבין שני ערכי הקיצון (Sheaffer et al. 1982) וכך עשינו בעבודה זו.

את ערכי CN לוקחים מתוך טבלאות שפרסם השרות לשימור הקרקע האמריקאי (ראה עמ' 170 אצל כרמון ושמיר 1997). הקשר בין S ל-CN נתון במשוואה, אשר לאחר התמרה מן היחידות המקוריות (אינצ'ים) למילימטרים מקבלת את הצורה הבאה:

$$(4.4) \quad S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

עבור תכסית משתנה מודל SCS מתייחס לשני סוגים של שטחים אטומים:

- שטח אטום רציף – בו השטח האטום מתנקז ישירות למערכת הניקוז או זורם מעל שטח חדיר אך בספיקה גבוהה מידי אשר אינה מאפשרת למים לחלחל במידה משמעותית בשטח החדיר.
 - שטח אטום מקוטע – מגרש בו השטח האטום מתנקז אל השטח החדיר.
- את ערך ה-CN יש לחשב מתוך הנוסחה (TR-55, 1986, Appendix F)

$$(4.5) \quad CN_c = CN_p + \left(\frac{P_{imp}}{100} \right) (98 - CN_p) (1 - 0.5R)$$

כאשר:

CN_c – הינו ערך ה-CN המייצג את כלל הפולגון.

CN_p – ערך ה-CN עבור השטח החדיר.

P_{imp} – אחוז השטח האטום.

R – היחס בין השטח האטום המקוטע לסך השטח האטום.

ניתן לראות כי ככל שהערך R גדל ערך ה-CN הסופית המתקבל קטן, אין במדריך התייחסות למקורו של המקדם 0.5 הכופל אותו.

לשיטת SCS חסרונות הנובעים בעיקר מן העובדה שפותחה עבור תנאים מטאורולוגיים, שימושי קרקע ומאפייני תכסית המאפיינים את ארצות הברית ולא בהכרח את ישראל (גלר י, 1997). לכן יש לנקוט זהירות (ראה להלן) בבחירת מקדמי CN. יתרונה בכך שהיא משתמשת בנתונים שניתן להשיג והיא קלה לחישוב.

יתרונות המודל:

- למרות שהמודל פותח בגרסתו המקורית עבור קרקעות חקלאיות, גרסתו המעודכנת, 1986, תואמת גם לשטחים עירוניים (Hawkins et al, 2009. p-10).

- הנתונים הנדרשים למודל (תכונות קרקע וסיווג התכסית, כמויות הגשם לפרקי זמן של 24 שעות) לרוב זמינים.
חסרונות המודל:
- המודל מבוסס על נתונים שנאספו בארה"ב (Sheaffer et al. 1982) ולכן אינו מתאים בהכרח לתנאים בארץ. עם זאת, היות והוא נחשב מתאים לכל חלקיה של ארה"ב, שבה יש מגוון רחב של תנאים מטאורולוגיים והידרולוגיים, הרי שסביר להשתמש בו גם בארץ. עם זאת, יש לנקוט זהירות בשימוש במקדמי הנגר (מקדמי CN, ר' להלן) מתוך הטבלה המלווה את המודל, ולקחת רק מקדמים לשטחים הומוגניים, כגון שטח אטום או חדיר, ולא לשטחים עם שימושי קרקע משולבים שהינם טיפוסיים רק לצורות הבנייה בארה"ב (כרמון ושמיר, 1997).
- המודל הוצב לצרכי תכנון והשוואת חלופות ולא לצורך קבלת חיזוי כמות נגר עבור סופה ספציפית. ערכי כמות הגשם המוזנים לנוסחה הינם עובי גשם במשך 24 שעות של סופה. הזנת הנוסחה בערכי עובי גשם עבור סופה אמיתית אינה צפויה לתת ערך ספציפי של הנגר לסופה זו. (TR-55, 1986 p23).
- המודל פחות מדויק עבור נפח נגר מחושב בעובי של פחות מ- 18 מ"מ (Maidment., 1993, pp 5.29).
- השיטה מתאימה רק עבור אחת מארבע התפלגויות הגשם שהוגדרו, התפלגויות אלו מבוססות על נפח גשם יומי. לא קיים מידע עבור שימוש במודל עבור התפלגויות אחרות (TR-55, 1986 p1-1).
- הסתמכות על גשם יומי בלבד. לא ניתן לחזות כמות נגר עבור אירועי גשם בודדים קצרים מפרק זמן זה. (Walesh, 1989 p.124).
- אין ביטוי במודל לפרוס עוצמת הגשם במהלך הסופה (Hawkins et al, 2009. p-65).
- חלקים אחדים במודל הינם בעלי בסיס פיזיקאלי, למשל חדירות הקרקע, אך המשוואות הינן אמפיריות.
- כאשר ישנם מספר סוגי תכסית בשטח, המודל ממליץ לבצע ממוצע משוקלל של מקדמי CN. הוכח והודגם ששקלול זה ממתן את השפעת השטחים האטומים (כרמון ושמיר, 1997, ע"מ 169). לדוגמא: באגן היקוות עם 60% שטח אטום (CN=98) ו-40% שטח חדיר (CN=39) מתקבל ממוצע משוקלל CN=74.4. סף הגשם שרק מעליו ייווצר נגר המתאים לערך זה של המקדם הוא 17.4 מ"מ, בעוד שלמעשה יתחיל נגר מן השטח האטום (CN=98) כבר בעובי גשם כ-1 מ"מ. אם השטח האטום מוליד את הנגר שנוצר עליו למערכת הניקוז ולמוצא האגן ישירות הרי שהשימוש בערך מקדם נמוך יותר (CN=74.4) אינו מבטא נכון את התוצאה הזו.
- על מנת להתמודד עם החיסרון המתואר בסעיף האחרון, ממליצים כרמון ושמיר (1997) לחשב את הנגר הנוצר עבור כל סוג תכסית ולכפול אותו בסך השטח של אותו סוג התכסית חלקי השטח הכולל ולסכום את תרומות חלקי השטח. שיטה זו תיקרא בהמשך "שיטת נפח משוקלל" כאשר שיטת החישוב המקורית תקרא "שיטת מקדם CN משוקלל".

חישוב נפח הנגר היוצא מהאגן ב-"שיטת נפח משוקלל", כסכום תרומות הנגר מהשטחים השונים :

$$(4.6) \quad Q[m^3] = \sum_i A_i \times \begin{cases} \frac{(P - 0.2 \times S_i)^2}{(P + 0.8 \times S_i)} & P > 0.2 \times S_i \\ 0 & P \leq 0.2 \times S_i \end{cases}$$

לעמת זאת, חישוב ספיקת הנגר היוצא מאגן על ידי חישוב מקדם CN משוקלל:

$$(4.7) \quad CN_{avrege} = \frac{\sum_i A_i \times CN_i}{A_{total}}; S_{avrege} = 25.4 \times \left(\frac{1000}{CN_{avrege}} - 10 \right)$$

$$(4.8) \quad Q[m^3] = A_{total} \times \begin{cases} \frac{(P - 0.2 \times S_{avrege})^2}{(P + 0.8 \times S_{avrege})} & P > 0.2 \times S_{avrege} \\ 0 & P \leq 0.2 \times S_{avrege} \end{cases}$$

A_{total} הינו סך השטח הכולל, i הינו אינדקס עבור סך הפולגונים באגן, S_{avrege} ו- CN_{avrege} הינם ערכים ממוצעים לכלל האגן.

4.3.2 מודל SCS-מבוזר (DSCS): שילוב מודל SCS עם מערכת מידע גיאוגרפי

על מנת לעמוד במטרות העבודה כפי שפורטו בפרק 1, יש צורך לאמוד גם את השפעת מיקום השטחים באגן ביצירת נגר עילי, דבר שאין ביכולת שיטת SCS לבטא בצורתה הנוכחית, הן בשיטת מקדם CN משוקלל והן בשיטת נפח משוקלל המתעלמת ממיקום השטחים ומהלך זרימת הנגר ביניהם ומתן ביטוי רק ליכולתם להחדיר מים. מודל זה נקרא Distributed SCS = DSCS.

המודל המבוזר יתייחס למיקומם של שטחי המשנה של האגן על סוגיהם: מגרשי מגורים, בניינים ציבוריים, חנויות מלאכה ומוסכים, כבישים, שצ"פים ושטחים פתוחים לא-מפותחים ולקשרי הגומלין ביניהם כתוצאה ממיקומם במרחב.

בכדי לתת ביטוי למיקום השטחים שולב מודל SCS עם תוכנת GIS באופן הבא: (Cristina et al., 2005). האגן יוצג על ידי מספר שכבות מידע בתוכנת Arc GIS, שיכבה אחת בה מחולק האגן למספר סוגי פוליוגונים בעלי מאפייני שטח וסוג תכסית הבא לידי ביטוי כערך CN. סוגי הפוליוגונים הינם אזורי תעשייה, בנייני מגורים, בניינים ציבוריים, שטחים טבעיים ושטחים ציבוריים פתוחים. לכך נוספה שיכבה של קווי גובה ברזולוציה של 5 מטר. על ידי שילוב שתי השכבות מתקבלת רשת של פוליוגונים, כאשר עבור כל פוליוגון מתקבל ערך גובה מקסימאלי ומינימאלי, ערכים אלו מאפשרים לקבוע את כיוון מעבר המים בין פוליוגונים שכנים, מפוליוגון גבוה לנמוך.

הנגר היוצא מתוך כל פוליוגון חושב על ידי שימוש בנוסחת SCS כאשר סך הגשם המייצר נגר חושב כסכום כמות הגשם על הפוליוגון עצמו ועוד כמות הנגר הנכנס לפוליוגון מפוליוגונים עליונים, כך שמתקבל ערך כמות המים היוצאת תוך התייחסות למקומו של הפוליוגון ברשת הזרימה של השטח כולו.

כדי לייצג בצורה מליאה עוד יותר את התנהגות האגן היה צריך להתייחס לזמן מעבר המים בין פוליוגון לפוליוגון, אך פעולה זו תיצור מורכבות חישובית גבוהה וצורך בנתונים מטאורולוגיים ומדידות שטח, דבר אשר יסרב במידה רבה את הכלי החישובי המוצע ועלול בעתיד למנוע שימוש בו.

על מנת למנוע סיבוכיות זו, מתייחסים לתגובת האגן לאירועי גשם כאשר זה מגיע לנקודת שיווי משקל הידרולוגית, כיוון שמודל SCS מותאם לעבודה עם נתונים ימתיים, ניתן להניח עוצמת גשם קבועה לאורך כל האירוע ולבצע את חישובי היווצרות הנגר עבור מצב בו כל הפוליוגונים מגיבים במצב של שיווי משקל הידרולוגי זה עם זה. כאשר פעולה זו נעשית עבור כל השטחים בו זמנית, מתקבלת רשת הזרימה באגן.

כיוון שנוסחת SCS מבוססת על יחידות של עובי גשם ולא נפח, יש להתאים את מעבר הנגר בין פוליוגונים בעלי שטח שונה לצורך הזנתם בנוסחה, לשם כך יש להכפיל את עובי הנגר בשטח הפוליוגון המייצר אותו על מנת לקבל ערך של נפח הנגר היוצא מאותו פוליוגון. לאחר מכן יש לחלק ערך זה בשטח הפוליוגון אשר אליו מובל הנגר כך שמתקבל מחדש ערך של עובי תרומת הנגר מן המעלה המותאם לשטח הפוליוגון הנוכחי, ביחידות של עובי המתאים לשימוש בנוסחה.

תוצאה זו סוכמים עם עובי הגשם ומזינים לנוסחת חישוב הנגר באופן הבא:

$$(4.9) \quad Q[m^3] = A \times \frac{\left(P + \frac{\sum R_i \times A_i}{A} - 0.2 \times S \right)^2}{\left(P + \frac{\sum R_i \times A_i}{A} + 0.8 \times S \right)}$$

i הינו אינדקס המיצג את כל הפוליגונים הצמודים לפוליגון ויוצרים נגר אשר מובל לפוליגון הנוכחי, כך ש- A_i הינו שטח כל אחד מהפוליגונים במעלה, A הינו שטח הפוליגון הנוכחי ו- R הינו נפח הנגר היוצא מפוליגון במעלה, כך ש- ΣR_i הינו סכום נפח הנגר הנכנס אל פוליגון מהמעלה.

לאחר שקובעים מתוך נתוני הגובה מהם יחסי הזרימה בין הפוליגונים מתקבלת רשת של פוליגונים וביניהם קשרי זרימה. לתוך רשת זו ניתן להזין כל עובי גשם ולקבל בנקודה הנמוכה ביותר באגן את כמות הנגר שזה מפיק.

בכדי להדגים את השיטה, מובאת להלן דוגמת חישוב מפורטת עבור עובי גשם של 20 מילימטר במערכת בעלת 4 פוליגונים, שני פוליגונים הממוקמים במעלה, שטחם 0.3 דונם ו-0.5 דונם, מקדם ה-CN הינו 97 ו-84 בהתאמה. פוליגונים אלו מזרימים את הנגר הנוצר בהם אל הפוליגון אשר במורדם, שיטחו 1.8 דונם ומקדם ה-CN הינו 84. מפוליגון זה זורמים המים אל הפוליגון במורד אשר שיטחו 1.2 דונם ומקדם ה-CN שלו הינו 97. מהלך הזרימה והחישוב מופיעים באיור 12. בטבלה 6 ניתן לראות השוואה בין נפחי הנגר המתקבלים מחישוב על פי המודל המבוזר, שיטת נפח משוקלל ומקדם CN משוקלל.

נפח נגר במוצא [מטר מעוקב]		
מקדם CN משוקלל Weighted CN	נפח משוקלל Weighted Volume	DSCS
16.17	23.56	20.05

טבלה 6 - השוואת נפחי נגר עבור רשת הזרימה המוצגת באיור 12

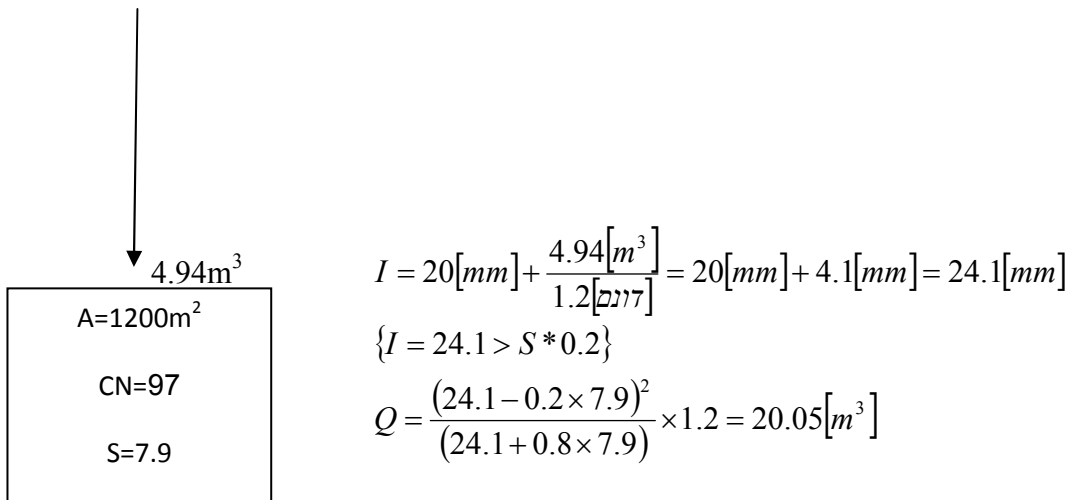
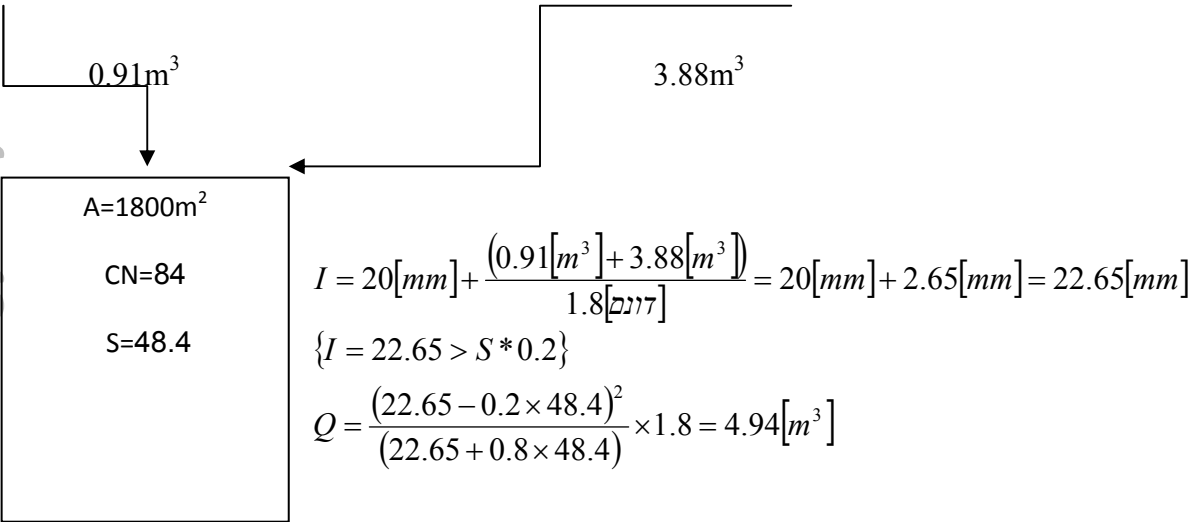
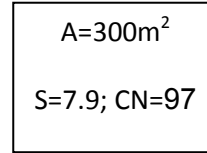
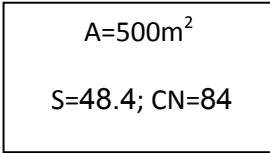
Table 6 – Comparison between runoff volumes for the flow network presented in Figure 12

$$\{I = 20 > S * 0.2\}$$

$$Q = \frac{(20 - 0.2 \times 48.4)^2}{(20 + 0.8 \times 48.4)} \times 0.5 = 0.91 [m^3]$$

$$\{I = 20 > S * 0.2\}$$

$$Q = \frac{(20 - 0.2 \times 7.9)^2}{(20 + 0.8 \times 7.9)} \times 0.3 = 3.88 [m^3]$$



20.05m³ נפח נגר מצטבר במוצא האגן:

איור 12 - דוגמה למהלך הזרימה והחישוב במודל SCS מבוזר

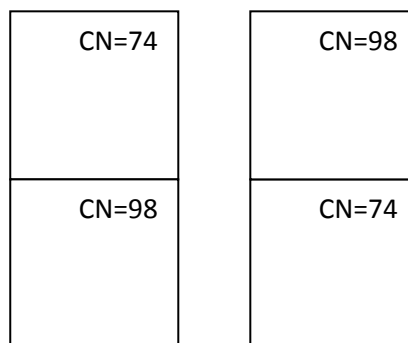
Figure 12 – Example of the flow process and the calculation of the Distributed SCS Model

4.3.3 בחינת מודל SCS-מבוזר על מערכים פשוטים של מגרשים

שיטה זו נוסתה עבור מספר מערכי פוליגונים ברמות מורכבות שונות המדמים מיבנה של מגרש, שכונה ומיבנן. במערכים אלו הוצבו שני סוגי שטחים, כבישים ומגרשים, ערך ה-CN שנבחר הינו CN=98 עבור הכבישים ו-CN=74 עבור המגרשים, עבור כל מערך בנייה נעשתה השוואה בין התוצאות המופקות מסופות שונות בין שיטת "מקדם CN משוקלל", "שיטת נפח משוקלל" ו"SCS מבוזר".

מערך מס' 1: מגרש יחיד, מחציתו חדירה ומחציתו אטומה, השיפוע מלמעלה למטה.

באיור 13. ניתן לראות שני מתארים אפשריים עבור מערך זה, מתאר אחד בו המחצית האטומה נמצאת במעלה (צד ימין) ומתאר שני בו המחצית החדירה נמצאת במעלה (צד שמאל).



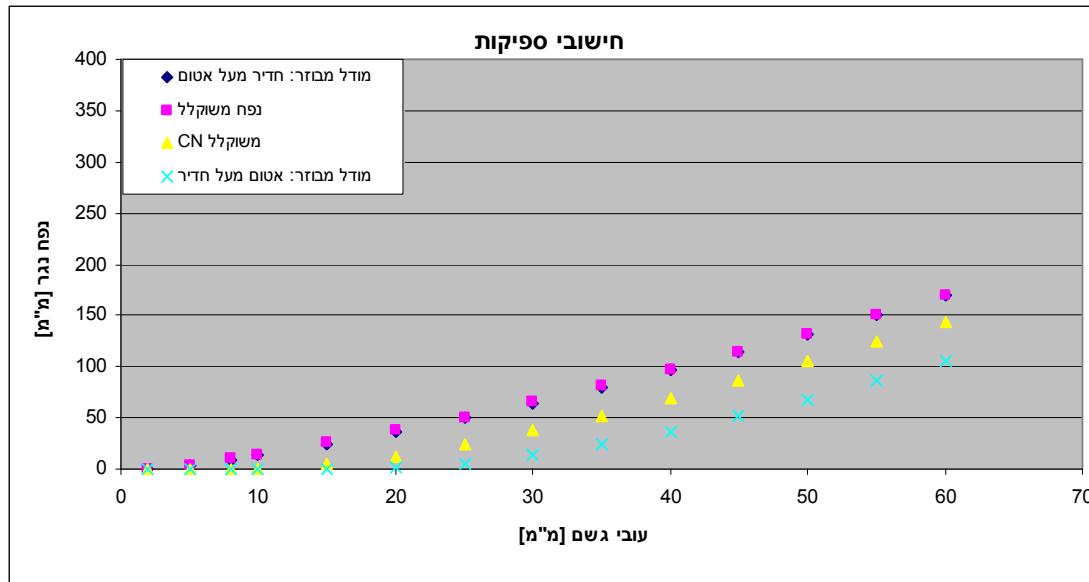
איור 13 - מתארים אפשריים עבור מערך מספר 1.

Figure 13 – Possible layouts of two land uses for Array Number 1

עבור שני המתארים חושב הנפח על פי מודל SCS, לפי נפח משוקלל, לפי מקדם CN משוקלל ועל פי המודל המבוזר, התוצאות מוצגות באיור 14. כיוון שחישוב נפח על פי מקדם CN משוקלל ונפח משוקלל אינו מגיב למיקום השטחים, עבור שני המתארים האפשריים אין שינוי בערכי הנפח בשיטות אלו.

עבור המצב בו השטח האטום נמצא במעלה מתקבלת כמות כמעט זהה של נגר לזו המחושבת באמצעות נפח משוקלל עבור כל עובי גשם בעוד שבמצב ההפוך מתקבלים ערכים הקטנים יותר במידה ניכרת. מתוצאות המודל המבוזר ניתן לראות כי מתאר השטח "אטום מעל חדיר" לא מייצר נגר עבור עובי גשם נמוך וכי כאשר הוא מייצר נגר, הכמות הנוצרת הינה קטנה בסדר גודל מהמתאר "חדיר מעל אטום", היחס בהפרשים אלו קטן ככל שעולה עובי הגשם. באם היו נבחרים מקדמי CN פחות קיצוניים זה מזה, ההפרש בין השניים היה מצטמצם. כמו כן ניתן לראות כי ככול שעולה עובי הגשם מצטמצם היחס בין שיטות החישוב השונות. הערה: ניתן היה כמובן גם לחלק את השטח לשטחים שווים בכיוון האורכי, ואז השטח האטום היה תורם את הנגר ישירות לגבול התחתון, הנמוך, של השטח, בלי שיעבור על השטח החדיר כלל.

ניתן ללמוד מאיור 14 כי עקומת נפח הנגר המחושב על ידי נפח משוקלל מהווה גבול עליון לעקומת המודל המבוזר, זאת כיוון ששיטת החישוב של נפח משוקלל נותנת ביטוי לכל שטחי התכסיות המייצרים נגר ללא קשר למיקומם והאפשרות של חלחול הנגר הנוצר בהם בשטחים אחרים במורד.

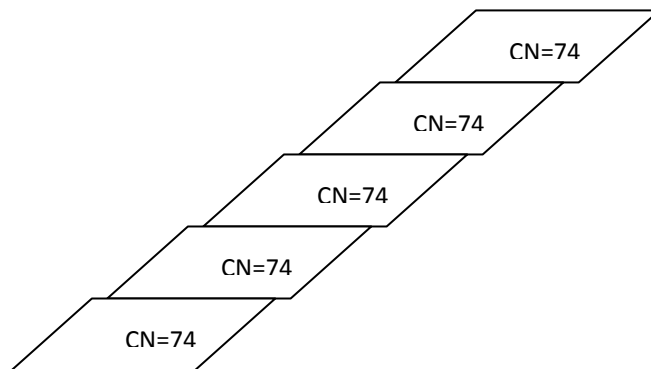


איור 14 - עובי נגר כנגד עובי גשם עבור שני סידורים מרחביים של שטח חדיר ואטום.

Figure 14 – Runoff depth versus rain depth for two spatial arrangements of permeable and impermeable surfaces

חישוב הנפח בשיטת "נפח משוקלל" ו"מקדם CN משוקלל" הניב תוצאות דומות לאלו של כרמון ושמיר (1997), בהם לא התקבל נגר בשיטת מקדם CN משוקלל עבור עוצמות גשם מתחת ל-10 מילימטר. כמו כן שיטת "מקדם CN משוקלל" הניבה נפחים נמוכים מאלו של חישוב בשיטת "נפח משוקלל". עם זאת, ככל שעלתה עוצמת הגשם, כך קטן הפרש היחס בין שתי השיטות.

מערך מס' 2: שורה של חמישה מגרשים זהים בגודל ובמקדם CN, במורד אחיד, איור 15



איור 15 - מערך מס' 2

Figure 15 – Spatial pattern No. 2

עבור מערך זה חושבו כמות המים הנכנסים לתוך כל שטח במ"מ, כמות המים היוצאים ממנו במ"מ וסך השטח המתנקז דרכו. לדוגמה, שטח מספר שלוש מנקז את הגשם אשר נופל בשטחו ואת הנגר אשר נכנס אל שיטחו מהשטחים אשר נמצאים במעלה ממנו, שטח 2 אשר מקבל את הגשם הנופל בשטחו ואת הנגר משטח 1 המתנקז אליו. כמו כן מוצג הפרמטר "מקדם נגר", אשר מבטא את היחס בין כמות המים היוצאים מכל שטח ובין סך כמות המים הנכנסים אליו, גשם ונגר מן המעלה.

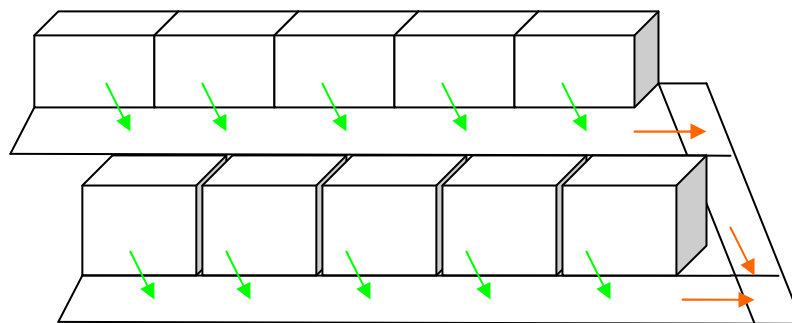
בטבלה 7 מובאות תוצאות החישוב, עבור עובי גשם של 50 מ"מ. ניתן לראות כי ככול שמתקדמים עם כיוון הזרימה כל מגרש מקבל יותר מים מקודמו, כאשר השטח המתנקז לכל מגרש גדל באופן ליניארי (כיוון ששטח המגרשים זהה). למרות שכמות המים היוצאת מכל מגרש גדלה ככל שמתקדמים עם כיוון הזרימה ערך המקדם יורד. הסיבה לכך היא שבכל מגרש מתבצעת פעולות של אידוי, עיכוב זרימה, וחלחול הבאות לידי ביטוי במקדם ה-CN, וכל מגרש מיצר כמות קטנה יותר של נגר ביחס לכמות המים הנכנסת עליו. כך שבסופו של דבר, ערך המקדם המורכב ממונה, מים יוצאים, הגדל בקצב קטן יותר מהמכנה, מים נכנסים, קטן.

ID	CN	S	דונם	מים יוצאים	שטח ניקוז [דונם]	מקדם נגר	מים נכנסים
1	74	89.2	1	8.5	1	0.17	50.00
2	74	89.2	1	12.7	2	0.13	58.52
3	74	89.2	1	15.0	3	0.10	62.73
4	74	89.2	1	16.3	4	0.08	65.02
5	74	89.2	1	17.1	5	0.07	66.31

טבלה 7 - קבלה, החדרה ויצירת נגר בפוליגון במערך טורי, עבור גשם 50 מ"מ.

Table 7 – Runoff received, infiltrated and generated in a linear polygon for rain intensity of 50 mm

מערך מס' 3: שתי שורות מגרשי מגורים המתנקזים אל הכביש כביש, זורמים למוצא משותף. שיפועי הקרקע מלמעלה למטה ומשמאל לימין.



איור 16 – מערך מס' 3 - מדמה שכונה

Figure 16 – Pattern No. 3 – Simulated neighborhood

באיור 16 ניתן לראות מתאר המדמה שכונה, שורה עליונה של פוליגונים המייצגים מגרשים המתנקזים לפוליגון המייצג כביש, פוליגון זה מתנקז דרך פוליגון כביש אחר אל פוליגון הכביש המרכזי, שורה תחתונה של מגרשים המתנקזים לפוליגון כביש אשר גם מתנקז לפוליגון הכביש המרכזי. שטח כל פוליגון מגרש בשורה העליונה הינו 0.2 דונם, שטח כל פוליגון מגרש בשורה התחתונה הינו 0.3 דונם. שטח פוליגון הכביש אליו מתנקזת השורה העליונה ושטח פוליגון הכביש עליו מתנקזת השורה התחתונה הינו 0.7 דונם. שטח פוליגון הכביש אליו מתנקז העליון הינו 0.3 דונם והוא מתנקז לפוליגון

כביש בעל שטח של 0.4 דונם אשר בתורו מתנקז לפוליגון כביש בשטח 0.4 דונם. ערך ה-CN הנבחר לייצג את מגרשי המגורים הינו 74, הערך עבור הכבישים הינו 98. סך שטחי פוליגוני הכבישים שווה לסך פוליגוני המגרשים, תוצאות הספיקות מובאות בטבלה 8.

השוואת תוצאות שיטות החישוב נעשתה פעמיים, פעם אחת על פי מערך הבנייה אשר תואר לעיל אשר יקרא "חדיר מעל אטום" ופעם שנייה עבור אותו מתאר אך ערכי ה-CN הוחלפו בין שתי התכסיות כך שערך המייצג את המגרשים הינו 98 והערך המייצג את הכבישים הינו 74 מערך זה יקרה "אטום מעל חדיר".

עובי	אטום מעל חדיר			עובי	חדיר מעל אטום		
	DSCS	CN משוקלל	נפח משוקלל		DSCS	CN משוקלל	נפח משוקלל
mm	M ³	M ³	M ³	mm	M ³	M ³	M ³
15	0.04	4.71	25.46	15	24.73	4.71	25.46
20	1.43	12.96	37.36	20	36.74	12.96	37.36
25	5.68	24.10	50.58	25	50.02	24.10	50.58
30	13.20	37.43	65.06	30	64.52	37.43	65.06
35	23.72	52.48	80.58	35	80.06	52.48	80.58
40	36.73	68.88	96.98	40	96.49	68.88	96.98
45	51.74	86.39	114.15	45	113.67	86.39	114.15
50	68.31	104.80	131.98	50	131.52	104.80	131.98
100	275.0	316.1	333.5	100	333.2	316.1	333.5

טבלה 8 - השוואת נפחים בין שיטות חישוב שונות לשימושי קרקע באיור 16.

Table 8 – Comparison of runoff volumes between different calculation methods for the land use pattern in Figure 16

כיוון שסך שני סוגי השטחים היה זהה, תוצאות חישוב הנפח לא השתנו עבור שינוי מיקום השטחים, במורד או במעלה בשיטות "מקדם CN משוקלל" ו"נפח משוקלל". אך עבור שיטת החישוב DSCS התקבלו הבדלים משמעותיים בין חדיר במעלה (השפעה מועטה של המיקום) לבין חדיר במעלה (השפעה

ניכרת, שכן הנגר מן המעלה עובר על שטח חדיר ויכול לחלחל) עבור עוצמות גשם נמוכות, הפרשים הצטמצמו ככל שעלתה עוצמת הגשם.

מתוך התנהגות המודל ניתן לראות את חשיבות מיקום השטחים במרחב לצורך חישוב נפח הנגר ואת השפעת מיקום השטחים האטמים במעלה, לכן הוחלט לבחור במודל המבוזר לצורך חישוב והשוואת נפחי הנגר בין חלופות התכנון.

4.4 מודל לחישוב ספיקת שיא – השיטה הרציונלית.

לצורך השוואת בין ספיקות השיא של תוכניות הפיתוח נבחרה השיטה הרציונלית, שיטת CIA. השיטה פותחה ב-1889 על ידי Emil Kuichling, מהנדס ניקוז בעיר ניו יורק, והינה מיועדת לאגנים עירוניים (Kuichling, 1889). נעשו מספר מחקרים לצורך פיתוחה והוצעו מספר שיטות המבוססות על המבנה המקורי, שיטה רציונלית הסתברותית (Horner, 1960), שיטה רציונלית קינמטית (Akan, 1993), שיטת (Walesh, 1989) modified rational method. כמו כן נערכו מחקרים אשר מטרתם לכייל את מקדמי השיטה (עצמון, 1992, זיגל, 1998 ו-Boyd, 1994, 2005) ולהתאימה לאזורים ספציפיים. דוגמת שיטת תחל"ס (גרתי וחובריו, 1993) אשר פותחה על ידי התחנה לחקר הסחף. כיום נפוץ שימושה בצורתה המקורית על ידי מהנדסי ניקוז.

הנחות היסוד של השיטה הרציונלית:

- משך הגשם העודף (עובי גשם העולה על כושר החלחול והאצירה של האגן) היורד על שטח אגן היקוות (tr) שווה או גדול מזמן הריכוז של האגן (tc), שהינו משך הזמן שלוקח לטיפה להגיע מהנקודה הרחוקה ביותר של האגן לנקודת המוצא.
- ספיקת הנגר המכסימלית הצפויה תתרחש כאשר משך הגשם יהיה כזה שכל אלמנט באגן ההיקוות יתרום לזרימה במוצא.
- ספיקת השיא הצפויה מאגן ההיקוות הינה ביחס ישר לעוצמת הגשם, $Q = f(I)$. קשר זה אינו מתייחס להפרשי הזמן של תרומת השטחים השונים באגן. ספיקת השיא תתרחש לאחר פרק זמן tc מרגע תחילת הגשם.
- בחירת עוצמת הגשם על פי זמן הריכוז (מתוך עקומת עוצמה-משך-הסתברות) מניחה כי עוצמת הגשם תהיה קבועה משל כל פרק הזמן tc ואחידה עבור כל האגן.

חסרונות:

- השיטה מבוססת על הערכת זמן הריכוז וזה מושפע מתכונות האגן (תכסית, שיפוע, אורך, מידת החספוס, אחוז השטח האטום וכ"ו). במשך השנים הוצעו מספר קשרים מתמטיים לזמן הריכוז אך רובם אינם מבוססים על ניסוח פיזיקאלי מלא (Maidment, 1993. P-9.17).
- זמן הריכוז למעשה תלוי בעוצמת הגשם. השיטה הרציונלית מציעה לקבוע את העוצמה המתאימה לסופת גשם בעלת משך זמן גדול או שווה לזמן הריכוז לתקופת חזרה כלשהי. כך נוצרת תלות מעגלית שאינה פתורה: העוצמה לחישוב הנגר תלויה בזמן הריכוז וזה תלוי בעוצמה.
- ההנחה כי עוצמת הגשם קבועה ואחידה על פני שטח האגן אינה מייצגת בצורה טובה את המציאות, ככל ששטח האגן גדול יותר או משך הסופה ארוך יותר והנחה זו מייצגת את המציאות בצורה פחות טובה (Walesh, 1989. p-105).
- אין דרך ישירה ומדויקת לקבל את נפח הנגר המצטבר (Sheaffer et al, 1982. p-100).

- השיטה אינה מתחשבת ברטיבות הקרקע, אוגר שקעים והתאדות.
- בחירת קבוע מקדם הנגר מבוססת על שיקול דעתו של המשתמש (Maidment, 1993. p-9.18).

• מקדם ספיקת השיא לאגן הטרוגני מהווה שקלול של המקדמים בשטח האגן ביחס לאחוז שטחם מכלל שטח האגן, אך אינו מיחס חשיבות למיקומם. לדוגמא, המודל מתייחס לשטח אטום רציף באותה צורה כמו לשטח אטום מקוטע.

- ישנו חסר בנתוני גשמים מעובדים ומסוככים לעקומות עצמה-משך-תקופות חזרה המתאימים לאתרים שונים ברחבי הארץ, דבר המאלץ מתכננים להסתמך על נתונים מאזורים סמוכים שאינם זהים לשטח המתוכנן. (כרמון ושמיר, 2007. ע"מ 169)

יתרונות:

- השיטה קלה לשימוש.
- ניתן על ידי שינוי הפרמטר C לקבל בצורה קלה יחסית מהם השפעות העיור על ספיקות השיא של הנגר.

$$(4.10) \quad Q = C \times I_{tc} \times A$$

המודל נתון במשוואה:

Q – ספיקת שיא [מ"ק/שנייה].

C – מקדם הנגר [חסר יחידות].

I_{tc} – עוצמת הגשם [מ"מ/שעה].

A – שטח [דונם].

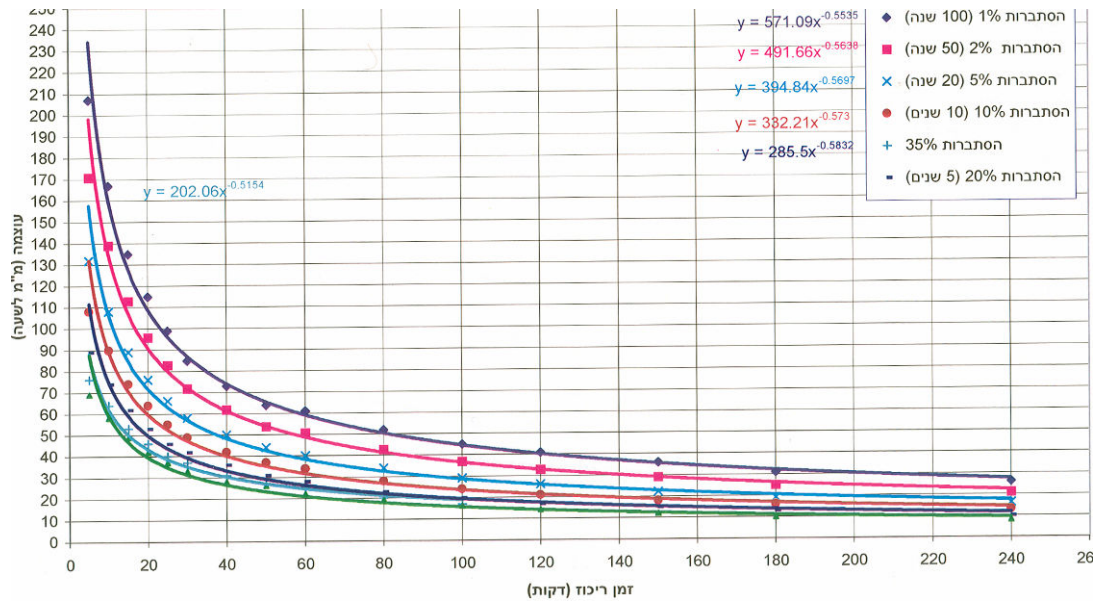
ערך עוצמת הגשם שיש להזין לנוסחה תלוי בזמן ריכוז האגן, t_c , וזה הינו פונקציה של אורך נתיב זרימת המים במטרים, L, ושיפועו, S חסר יחידות, ומתקבל מתוך נוסחת Kirpich (Pilgrim et al., 1993):

$$T_c = 0.0194 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0.77} \quad (4.11)$$

את זמן הריכוז יש להציב במשוואת או עקומת עוצמה-זמן-הסתברות עבור תקופת החזרה הנבחרת. העקומה/המשוואה מבטאת את משך הזמן שגשם בעוצמה מסוימת ירד עבור סופה בעלת הסתברות (תקופת חזרה) מסוימת. איור 17 הינו דוגמה ליחסי עוצמה-זמן-הסתברות, שנבנה מנתונים אשר נאספו במשך כ-50 שנה בתחנה המטאורולוגית בנמל חיפה. בוחרים את הפונקציה המייצגת את ההסתברות אשר תואמת את אופי הפיתוח ודרישות השטח ומתקבל הערך I_{Tc} עבור ערך זמן הריכוז שחושב. בשטח אשר נזקי ההצפה בו אינם משמעותיים ניתן לבחור הסתברות גבוהה יחסית (תקופת חזרה קצרה) ואילו

בשטח אשר נזקי ההצפה בו הינם משמעותיים יש לבחור הסברות נמוכה יחסית (תקופת חזרה ארוכה). למשל, באיור 17 המשוואה המייצגת הסברות חזרה של 5 שנים (הסברות 20% בשנה כלשהי):

$$(4.12) \quad I_{20\%} = 285.5 * T^{-0.5832}$$



איור 17- עוצמה-משך-הסברות, הנתונים נלקחו מתחנת מדידה באזור נמל חיפה

Figure 17 – Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves, for the rainfall station in the Haifa Port

את מקדם הנגר יש להרכיב מתוך טבלת המקדמים על ידי ממוצע משוקלל המיצג את השפעת התכסית על פי אחוז שטחה מתוך כלל השטח (Viessman et al ,1977. p-508). בטבלה מספר 9 ניתן לראות את מקדמי ספיקת הנגר עבור התכסיות השונות.

Business		Streets	
Downtown areas	0.7-0.95	Asphaltic	0.7-0.95
Neighborhood areas	0.5-0.7	Concrete	0.8-0.95
Residential		brick	0.7-0.85
Single family areas	0.3-0.5	Drives and walks	0.7-0.85
Multiunit, detached	0.4-0.6	Roofs	0.75-0.95
Multiunit, attached	0.6-0.75	Lawns; sandy soil	
Residential (suburban)	0.25-0.4	Flat 2%	0.05-0.1
Apartments dwelling areas	0.5-0.7	Average 2-7%	0.1-0.15
Industrial		Steep 7%	0.15-0.2
Light areas	0.5-0.8	Lawns: heavy soil	
Heavy areas	0.6-0.9	Flat 2%	0.13-0.17
Parks, cemetery	0.1-0.25	Average 2-7%	0.18-0.22
Playgrounds	0.2-0.35	Steep 7%	0.25-0.35
Railroad yard areas	0.2-0.4		
Unimproved areas	0.1-0.3		

טבלה 9 - מקדמי נגר לספיקת שיא (ASCE 1969, in Viessman & Lewis, 1977)

Table 9 – Peak discharge coefficients (ASCE 1969, in Viessman & Lewis, 1977)

השיטה הרציונלית מאפשרת השוואת ספיקת שיא בין שתי חלופות תכנון, לכן נבחרה לצורך השוואה בין התוכנית המאושרת והתוכנית המוצעת, אך אינה מאפשרת לחשב את השפעותיהם של מתקני ניהול נגר שונים אשר משפיעים על זמן הריכוז באגן. על מנת לחשב את השפעתם של מתקני אצירה ואגירה דרושה הידרוגרמה, שהיא מהלך הספיקות על ציר הזמן. לצורך כך נבחרה שיטת בניית ההידרוגרמה של Sherman (1932) ושולבה עם השיטה הרציונלית.

4.4.1 יצירת הידרוגרמה המייצגת את תגובת האגן לאירוע גשם נתון

השיטה משתמשת בהנחות הבאות (Ritzema, 1994. p. 133-142):

1. ספיקת השיא במוצא האגן נמצאת ביחס ישר לעובי הגשם.
 2. פירוס בזמן של הספיקות כתוצאה מאירוע גשם כלשהו לא תלוי באירוע הקודם.
- על מנת לייצר הידרוגרמה המייצגת את התגובה של האגן באירוע גשם מסוים מייצרים מספר הידרוגרמות המתאימות כל אחת לגשם שמשכו "הזמן קריטי" של אותו אגן וסכימתן. זמן קריטי הוא הזמן המקסימאלי בו פרוס הגשם במהלך הסופה אינו משפיע על תגובת האגן. על מנת לייצר את ההידרוגרמה של סופת גשם נתונה, מחלקים את משך הסופה לפרקי של "זמן קריטי", וסוכמים את ההידרוגרמות המתקבלות מכל אחד מפרקי הזמן האלה (מוזזים על ציר הזמן בהתאמה למשכו של הגשם הזה) כל אחת מתקבלת מהידרוגרמת היחידה על פי עובי הגשם המתאים. הידרוגרמת יחידה הינו ייצוג של ספיקת הנגר במוצא האגן כתוצאה מסופת יחידה, בה עובי הגשם הינו 1 מ"מ, ומשך אירוע גשם השווה או קטן למשך זמן קריטי, ΔD .

זמן קריטי תלוי בזמן בו מופיעה ספיקת השיא, t_p , לפי הקשר הבא:

$$(4.13) \quad \Delta D = \frac{t_p}{4}$$

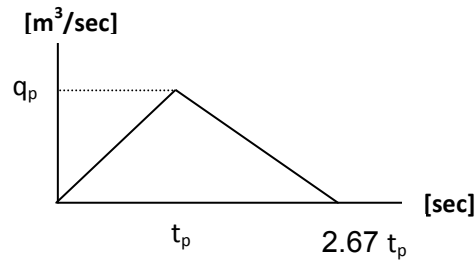
כאשר t_p תלוי בזמן ריכוז האגן לפי הקשר:

$$(4.14) \quad t_p = \frac{2}{3} t_c$$

q_p , ספיקת השיא של הידרוגרמת יחידה, באירוע גשם קטן או שווה לזמן קריטי מתקבל מתוך משוואה 4.14, כאשר משך כל אירוע הגשם הינו $2.67 * t_p$.

$$(4.15) \quad q_p \left[\frac{m^3}{sec} \right] = \frac{0.208 \times A [Km^2]}{t_p [hr]}$$

באזור 18 ניתן לראות את המבנה של הידרוגרמת היחידה. סך השטח מתחת לאיור שווה לנפח הגשם, 1 מ"מ.



איור 18 - הידרוגרמת יחידה.

Figure 18 – Unit Hydrograph

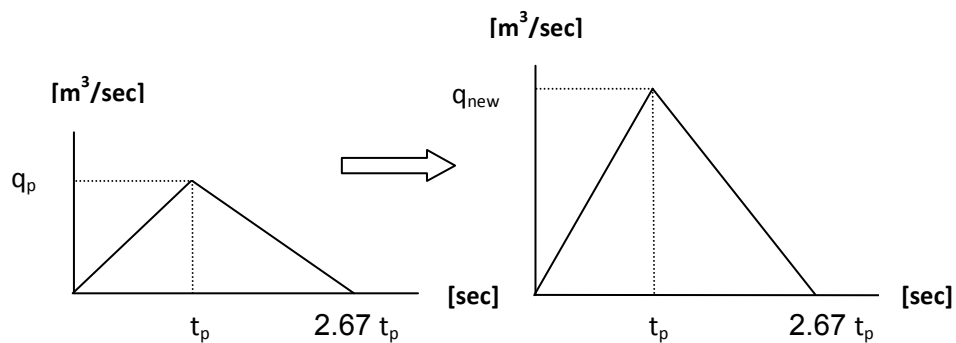
מספר ההידרוגרמות אשר יסכמו, n , נקבע על ידי חלוקת משך הסופה בערך הזמן הקריטי:

$$(4.16) \quad n = \frac{t}{\Delta D}$$

עובי הגשם של כל הידרוגרמת יחידה, d_i , מתקבל על ידי חלוקת עובי הגשם של כל האירוע במספר ההידרוגרמות:

$$(4.17) \quad d_i = \frac{d}{n}$$

בהתבסס על הנחה מספר 2 (אי תלות התגובה ליחידות גשם עוקבות), ניתן להכפיל את הערך q_p בעובי גשם d_i ולשמור על היחס בין זמן ספיקת השיא למשך כל אירוע הגשם, $2.67 \cdot t_p$ כפי שניתן לראות באיור 19.



איור 19 - התאמת ספיקת השיא של הידרוגרמת היחידה לאירוע הגשם.

Figure 19 – Adjustment of the maximum flow of the Unit Hydrograph for a rain event

עבור גבעת זמר במצבה הטבעי, בניית ההידרוגרמה נעשתה עבור הסופה אשר שימשה לחישוב ספיקת השיא לפי השיטה הרציונלית למצב פיתוח זה, אך כיוון שבניית ההידרוגרמה אינה מבטאת את יכולת החדור של התוואי, התקבלה הידרוגרמה בעלת ספיקת שיא הגדולה מזו שהתקבלה מתוך שימוש בשיטה

הרציונלית ולכן היה צורך לכייל את תוצאות השיטה כך שיעמדו בקנה אחד עם אלו של השיטה הרציונלית, הדבר נעשה על ידי הכפלת עוצמת הגשם במקדם באופן הבא:

זמן הריכוז אשר הינו תוצר של מבנה האגן במצבו הטבעי חושב וערכו 10.7 דקות, עוצמת הגשם הנבחרת עבור זמן ריכוז זה (מאיור 17), בהסתברות חזרה של 1 ל-5 שנים הינה 71.46 מ"מ לשעה. ערך זה הוכפל במקדם 0.58, שחושב כך שתוצאת ספיקת השיא הסופית תהיה שווה לזו של השטח לפני הפיתוח, אשר הינה 1.8 מ"ק לשנייה. עוצמת הגשם שהתקבלה היא 41.44 מ"מ לשעה. על השימוש לצרכי תכנון בהסתברות של 1 ל-5 שנים ראה להלן, בסוף 5.23 (בעמ' 85).

זמן ספיקת השיא, t_p , חושב על ידי היחס ממשוואה 4.14 וערכו 7.15 דקות, שהן 0.1192 שעות.

הזמן הקריטי חושב על ידי שימוש במשוואה 4.13 וערכו 1.79 דקות.

מספר ההידרוגרמות אשר יש לסכום, n , חושבו במשוואה 4.16 והוא שווה ל-6.

עוביה של כל הידרוגרמה חושב במשוואה 4.17 והוא שווה ל-1.24 מ"מ.

ספיקת שיא האגן חושבה במשוואה 4.15:

$$q_p \left[\frac{m^3}{sec} \right] = \frac{0.208 \times A [Km^2]}{t_p [hr]} = \frac{0.208 * 0.229}{7.15/60} = 0.4 \left[\frac{m^3}{sec} \right]$$

ומכפלתו בערך d_i שווה ל-0.49 מ"ר לשנייה.

בטבלה מספר 10 ניתן לראות את ערכי ההידרוגרמות, הפרשי הזמן ומספר הפעמים אשר נסכמו.

טור מספר 1 מציינ זמן, טורים 2-7 מציינים את הספיקה בזמן בשש ההידרוגרמות החלקיות, בטור 8 מסוכמות שש ההידרוגרמות בכל נקודת זמן, והתוצאה היא הידרוגרמת הזרימה של האגן כולו עבור אירוע הגשם ששכיחותו אחת לחמש שנים (הסתברות 20% בשנה כלשהי).

1 זמן [דקות]	2	3	4	5	6	7	8 ספיקה [מק/שנייה]
	ΔD						
	2.36	4.73	7.09	9.45	11.82	14.18	
0	0.00	0	0	0	0	0	0
0.5	0.03	0	0	0	0	0	0.03
1	0.07	0	0	0	0	0	0.07
1.5	0.10	0	0	0	0	0	0.10
2	0.14	0	0	0	0	0	0.14
2.5	0.17	0.01	0	0	0	0	0.18

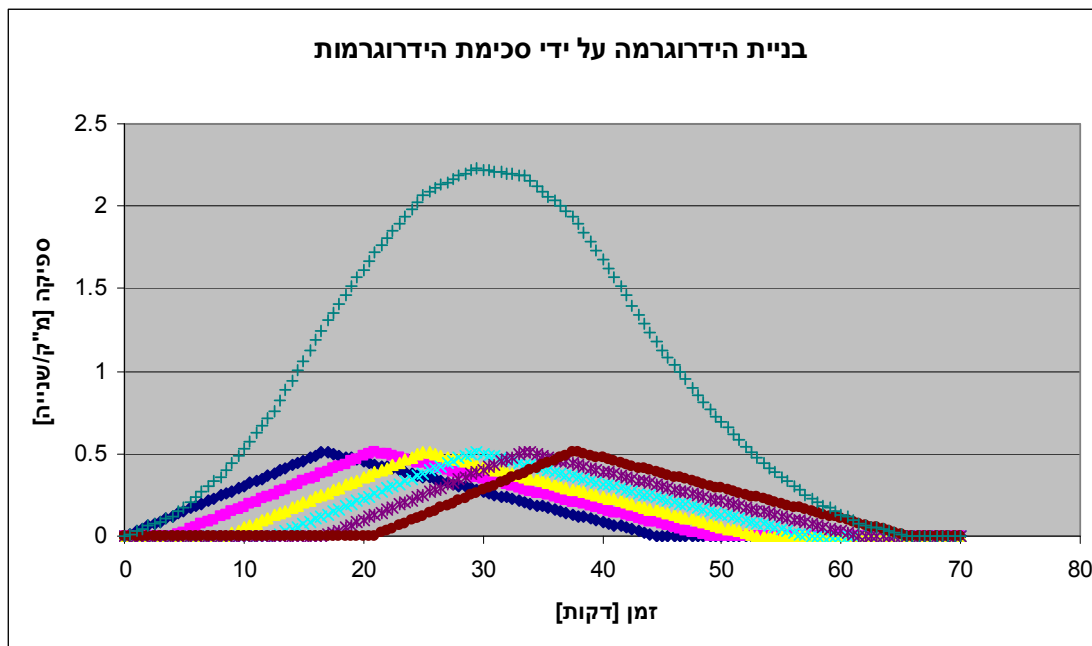
1	2	3	4	5	6	7	8
	ΔD						
3	0.21	0.04	0	0	0	0	0.25
3.5	0.24	0.08	0	0	0	0	0.32
4	0.27	0.11	0	0	0	0	0.39
4.5	0.31	0.15	0	0	0	0	0.45
5	0.34	0.18	0.02	0	0	0	0.54
5.5	0.38	0.21	0.05	0	0	0	0.64
6	0.41	0.25	0.09	0	0	0	0.75
6.5	0.44	0.28	0.12	0	0	0	0.85
7	0.48	0.32	0.16	0	0	0	0.95
7.5	0.47	0.35	0.19	0.03	0	0	1.04
8	0.45	0.39	0.22	0.06	0	0	1.13
8.5	0.43	0.42	0.26	0.10	0	0	1.21
9	0.41	0.45	0.29	0.13	0	0	1.29
9.5	0.39	0.49	0.33	0.16	0	0	1.38
10	0.37	0.47	0.36	0.20	0.04	0	1.44
10.5	0.35	0.45	0.39	0.23	0.07	0	1.50
11	0.33	0.43	0.43	0.27	0.11	0	1.56
11.5	0.31	0.41	0.46	0.30	0.14	0	1.62
12	0.29	0.39	0.48	0.34	0.17	0.01	1.68
12.5	0.27	0.37	0.46	0.37	0.21	0.05	1.73
13	0.25	0.35	0.44	0.40	0.24	0.08	1.77
13.5	0.23	0.33	0.42	0.44	0.28	0.12	1.81
14	0.21	0.31	0.40	0.47	0.31	0.15	1.85
14.5	0.19	0.29	0.38	0.48	0.34	0.18	1.86
15	0.17	0.26	0.36	0.46	0.38	0.22	1.85
15.5	0.15	0.24	0.34	0.44	0.41	0.25	1.83
16	0.13	0.22	0.32	0.42	0.45	0.29	1.82
16.5	0.11	0.20	0.30	0.40	0.48	0.32	1.81
17	0.09	0.18	0.28	0.38	0.47	0.35	1.75
17.5	0.07	0.16	0.26	0.36	0.45	0.39	1.68
18	0.05	0.14	0.24	0.34	0.43	0.42	1.62
18.5	0.02	0.12	0.22	0.31	0.41	0.46	1.55
19	0	0.10	0.20	0.29	0.39	0.49	1.48
19.5	0	0.08	0.18	0.27	0.37	0.47	1.37
20	0	0.06	0.16	0.25	0.35	0.45	1.27
20.5	0	0.04	0.14	0.23	0.33	0.43	1.16
21	0	0.02	0.12	0.21	0.31	0.41	1.06
21.5	0	0	0.10	0.19	0.29	0.39	0.96
22	0	0	0.07	0.17	0.27	0.36	0.88
22.5	0	0	0.05	0.15	0.25	0.34	0.80
23	0	0	0.03	0.13	0.23	0.32	0.72
23.5	0	0	0.01	0.11	0.21	0.30	0.63
24	0	0	0	0.09	0.19	0.28	0.56
24.5	0	0	0	0.07	0.17	0.26	0.50
25	0	0	0	0.05	0.15	0.24	0.44
25.5	0	0	0	0.03	0.12	0.22	0.37

1	2	3	4	5	6	7	8
	ΔD						
26	0	0	0	0.01	0.10	0.20	0.31
26.5	0	0	0	0	0.08	0.18	0.26
27	0	0	0	0	0.06	0.16	0.22
27.5	0	0	0	0	0.04	0.14	0.18
28	0	0	0	0	0.02	0.12	0.14
28.5	0	0	0	0	0	0.10	0.10
29	0	0	0	0	0	0.08	0.08
29.5	0	0	0	0	0	0.06	0.06
30	0	0	0	0	0	0.04	0.04
30.5	0	0	0	0	0	0.02	0.02
31	0	0	0	0	0	0	0

טבלה 10: בניית הידרוגרמה מסכום הידרוגרמות מייצגות

Table 10 – Constructing a combined hydrograph by summing representative hydrographs

באיור 20 ניתן לראות כיצד סכימת שש הידרוגרמות (טורים 2-7) מובילה ליצירת הידרוגרמה אשר נתונה מובאים בטור השמאלי.



איור 20 - דוגמה לבניית הידרוגרמה על ידי סכימת מספר הידרוגרמות.

Figure 20 – Construction of a hydrograph by summing a number of unit hydrographs
ההידרוגרמה שהתקבלה מייצגת את ספיקת הנגר במוצא. ערך השיא שלה נקבע כך שיהיה זהה לזה שחושב בשיטה הרציונלית, כלומר 1.82 מ"ק לשניה. בנוסף לספיקת השיא נותנת ההידרוגרמה שהתקבל את מהלך זרימת הנגר לאורך האירוע.

הידרוגרמה זו שימשה בתהליך בחירת מתקני ניהול הנגר, אשר יפורט בסעיף 5.2.2 להלן.

5 יישום בגבעת זמר: תכנון קיים ותכנון חלופי

פרק זה ידון בתוכניות הפיתוח השונות בשכונת זמר וחשוב השפעתן על המשתנים אשר נבחרו לייצג את התגובה ההידרולוגית של השטח. שמיר וקרמון (2007) ממליצים על שיתוף פעולה בין מהנדסי הניקוז ומתכנני השכונה ואדריכלי הנוף לאורך כל שלבי התכנון. אולם במגבלות הזמן והאמצעים העומדים לרשות המחקר והתזה, החלופות המנותחות מהוות גירסה ראשונית, מבוססת על שיקולים הידרולוגיים, שאינן מביאות לידי ביטוי נאות את שיקוליהם של המתכננים ואדריכלי הנוף. בעולם המעשי צריך היה התהליך להימשך בדיון משותף עם בעלי מקצוע אלה, על מנת לבחון האם מה שמוצע כאן הגיוני וסביר מבחינת רווחת התושבים והאמצעים הסבירים למימוש תר"מ המוצעים כאן.

5.1 חלופות תכנון

נחזור ונזכיר את ארבע התכניות בעבודה זו:

תכנית מס' 1: תכנית מאושרת, אושרה בעירייה חיפה בתאריך 17.09.2001

תכנית מס' 1א: התכנית המאושרת, שהוספו בה מתקני תר"מ הבאים:

גגות ירוקים, משטחים חדירים, מתקני אגירה והשהייה תת קרקעיים, תעלות עשב.

תכנית מס' 2: חלופה מוצעת שבה סודרו שימושי הקרקע במתכונת שונה

תכנית מס' 2א: החלופה המוצעת 2, שהוספו בה מתקני תר"מ כמו בתכנית 1א.

החלופה המוצעת (חלופה מס' 2) מתבססת על פיזור שונה של שימושי הקרקע. היא נבנתה על פי שני עקרונות מנחים בהשוואה לתכנון המקורי: (1) סך השטח המפותח הינו זהה ו- (2) גודל/אחוז השטח של כל אחד משימושי הקרקע ישמר ככל הניתן בהתאם לתוכנית המקורית, כאשר אופן סידורם במרחב יהיה שונה. לא ניתן לשמור במדויק על השטחים האלה משום שבעת הזזת מגרשי מגורים ואחרים נוצרת גיאומטריה שונה במקצת.

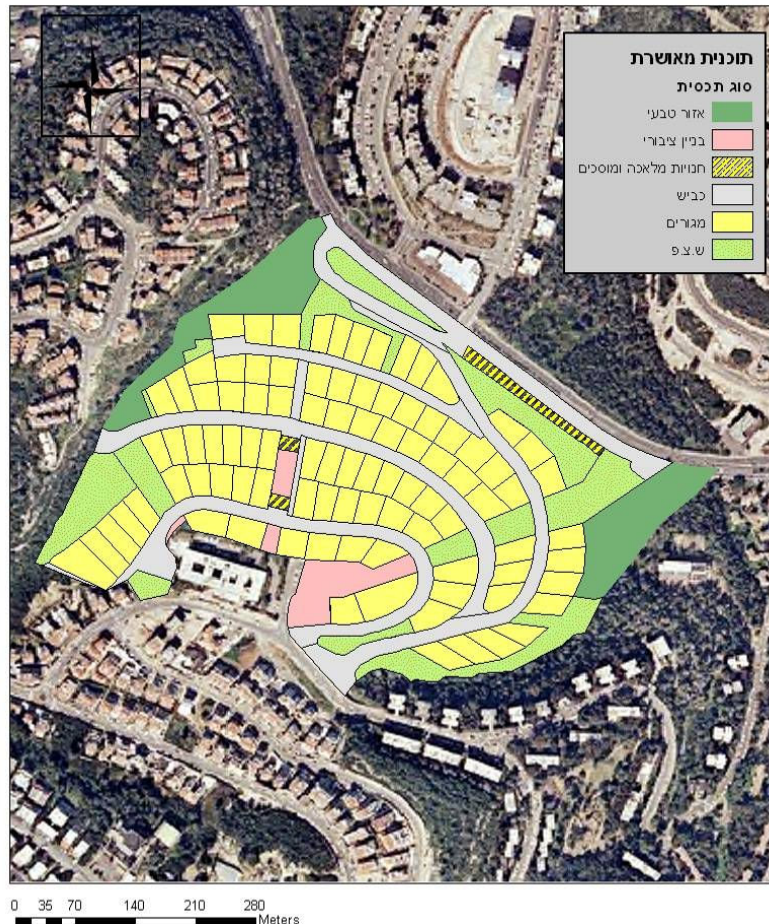
תכנון החלופה המוצעת התמקד בשלושה עקרונות המיועדים לניהול מושכל של הנגר:

- השטחים בעלי כושר החדור הנמוך ימוקמו ככל האפשר במעלה האגן, ואילו השטחים בעלי כושר חידור גבוה ימוקמו במורד.

- הנגר הנוצר בשטחים בעלי כושר חדור נמוך יועבר ככל הניתן אל שטחים בעלי כושר חדור גבוה.
 - הארכת זמן הזרימה של הנגר על ידי עיכובו במכשולים ו/או הארכת נתיב זרימתו.
- העיקרון הראשון יושם על ידי מיקום אזורי חנויות ומלאכה ומוסכים (שמרנו על "מוסכים" בתוך קטגוריה זו, משום שכך רשום בתכנית, גם אם יש ספק שאכן יהיו מוסכים בשכונה), בניינים ציבוריים ומגרשי מגורים במעלה ומיקום השטחים הפתוחים במורד.
- העיקרון השני יושם על ידי מיקום תעלת חדור בין המגרשים הסמוכים לכביש והכביש עצמו ומניעת הנגר הנוצר במגרשים אלו מלהגיע אל הכביש וממנו אל נקודת הניקוז, אלא הולכתו בתוך התעלות אל השטחים הפתוחים.
- העיקרון השלישי יושם על ידי עיצוב נתיב הכביש בצורה מתפתלת, היתרונות ההידרולוגיים המתקבלים מעיצוב הכביש בצורה זו הינם הארכת נתיב זרימת הנגר והקטנת השיפוע בנתיב זה. שינויים אלו מובילים להורדת מהירות הזרימה בכביש, הארכת זמן הריכוז ואיתו הקטנת עוצמת הגשם המתאימה לזמן הריכוז.

חלופה 1 – התוכנית המאושרת

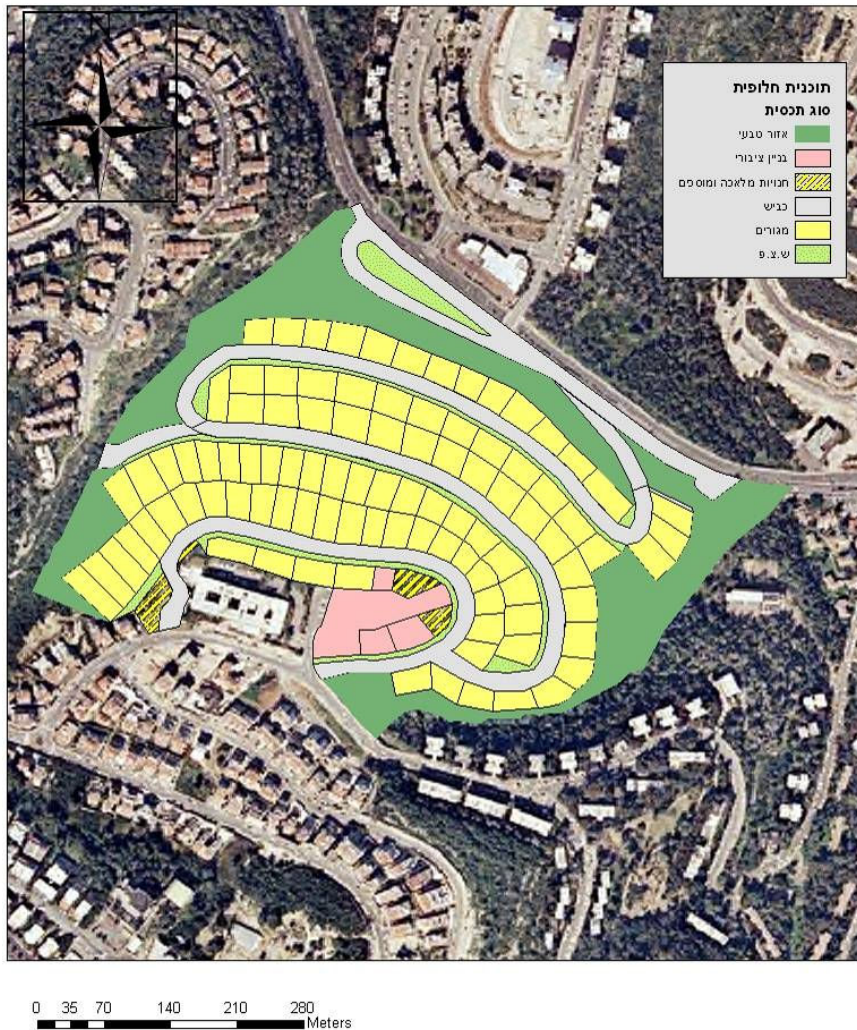
התוכנית המאושרת לאחר הזנתה לתוכנית GIS נראית באיור 21. השטחים הירוקים כהים מייצגים אזורים טבעיים, הוורודים – בנינים ציבוריים, צהובים עם פסים חומים - חנויות, מלאכה ומוסכים, האפורים – כבישים, צהובים – מגורים, ירוקים בהירים – שצ"פים. הגבעה משתפלת לשני צידי השכונה, אל ערוצים הורדים אל הכביש המהווה את גבולה הנמוך.



איור 21 - חלופה 1, תוכנית מאושרת לפיתוח בגבעת זמר

Figure 21 – Alternative No. 1 - Approved development plan for Givat Zemer

התוכנית המוצעת מוצגת באיור 22, משמעות צבעי שימושי הקרקע זהה לאלו שבתוכנית המאושרת.

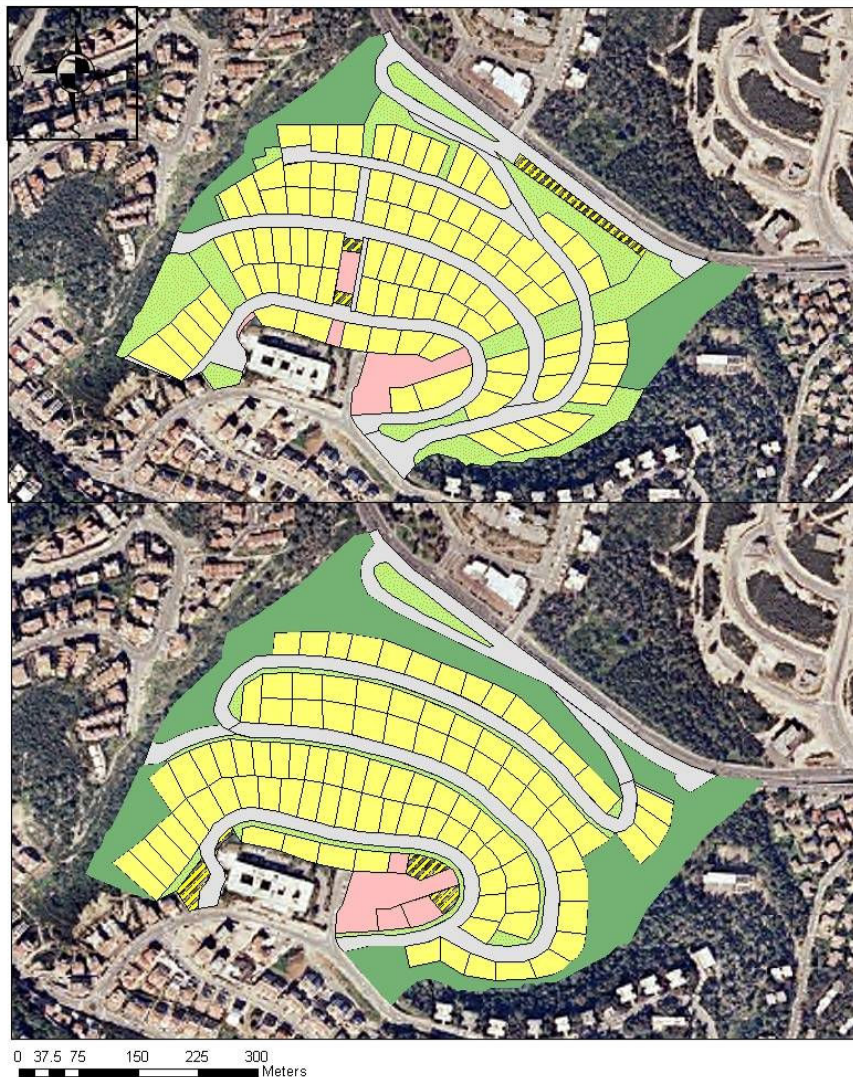


איור 22 - חלופה 2, תוכנית מוצעת לפיתוח בגבעת זמר

Figure 22 - Alternative No. 2 - Proposed development plan for Givat Zemer

השוואה איכותית בין חלופות 1 ו-2

באיור 23 מוצגות חלופות התכנון 1 ו-2 יחדיו כך שניתן להתרשם איכותית ביתר קלות מן ההבדלים ביניהן. בחלופה 1, המוצגת בחלקו העליון של הציור, חלק ניכר משטחי השצפ"ים ממוקמים במעלה ובתוך מרקם השכונה בעוד שבחלופה 2 מוקמו מרבית השטחים בעלי אופי חדיר (שטחים טבעיים ושצפ"ים) במורד.



איור 23 - השוואת התכנית המקורית והתכנית המוצעת (חלופות 1 ו-2)

Figure 23 – Comparison of the approved (original) plan and the proposed plan (Alternatives 1 and 2)

הבדל נוסף בין שתי חלופות התכנון הינו תוואי ואורך הכביש העובר בשכונה, שבחלופה 2 מתפתל וארוך יותר. בהשוואה לחלופה 1 יהיה צורך בחלופה 2 בנסיעה של עוד כ-700 מטר על מנת לעבור את השכונה לכל אורכה, אך מאידך חלק מהנסיעות בתוך השכונה מתקצרות עקב תכנון זה של הכביש. ראוי לשקול האם שינויים אלה בכביש מוצדקים מבחינת התרומה להקטנת הנגר במוצא לעומת השינוי באורכי הנסיעות.

בטבלה 11 מסוכמים מספר המגרשים וסך שטחם עבור כל שימוש קרקע, ניתן לראות כי סך שטח הפיתוח בחלופות זהה וכי השטח הכולל של כל סוגי שימושי הקרקע "חנויות מלאכה ומוסכים", "בניין ציבורי" ו"מגורים" דומה. יחד עם הזאת המגרשים "בניין ציבורי" ו"חנויות מלאכה ומוסכים" נוצרה

קירבה אחרת בין החלקים. למשל מבני הציבור בחלופה המוצעת נמצאים בסמיכות זה לזה, יותר מרוכזים מאשר בחלופה המקורית. תוואי הכביש בחלופה 2 אפשר את צמצום שטחו ביחס לחלופה 1 בכ-5.5 דונם. סך שטח שימושי הקרקע בעלי אופי חדיר, "אזור טבעי" ו"שצ"פ", בחלופה 1 הינו כ-63 דונם ובחלופה 2 כ-69 דונם, הגדלת סך השטחים החדירים התאפשר בזכות צמצום שטחו של הכביש. יש לזכור, כי בשטחי המגורים נותרים 15% חדירים, בשתי החלופות.

ההבדל בין סה"כ שטחי "אזור טבעי" ו"שצ"פ" בין החלופות נובע מנקודת המוצא של בניית חלופה 2 אשר נותנת משקל רב יותר לשיקולים הידרולוגיים. בשל חוסר ב"כלים נופיים" המבחינים בין שצ"פ לטבעי, הוחלט לשמור בחלופה 2 על סך השטח החדיר של שני שימושי הקרקע הללו ולאפשר בעתיד למהנדס נוף אשר יתרום משיקוליו לבחור את היחס ביניהם.

תכנון מוצע: חלופה 2		תכנון מקורי: חלופה 1		סוג
סה"כ שטח [דונם]	מספר החלקות	סה"כ שטח [דונם]	מספר החלקות	
				אזורים בעלי אופי אטום
3.2	4	3.1	3	חנויות מלאכה ומוסכים
8.3	6	8.1	4	בניין ציבורי
46.8	6	52.3	8	כביש
102.5	97	103.5	94	מגורים
160.8		167		סה"כ אטום
				אזורים בעלי אופי חדיר
55.7	5	23	2	אזור טבעי
13.3	6	39.8	13	ש.צ.פ
69		62.8		סה"כ חדיר
229.6	124	229.6	124	סה"כ כללי

טבלה 11 - השוואת שימושי הקרקע בין התכנון המקורי (חלופה 1) לתכנון המוצע (חלופה 2)

Table 11 - Comparison of land uses between the original plan (Alternative 1) and the proposed plan (Alternative 2)

בחירת מקדמי CN לפוליגונים בשכונת זמר

בחירת ערכי CN עבור סוגי שימושי הקרקע נעשתה בהתבסס על הטבלאות וההנחיות לשימוש במודל אך גם עם שיקול דעת בהסתמך על חופש הפעולה הניתן למתכנן במסגרת המודל, כאמור במדריך: "curve numbers describe average conditions that are useful for design purposes" (TR-55, 1986)

על מנת לבחור ערכי CN מייצגים עבור שימושי הקרקע השונים יש לאפיין תחילה את אופי הפיתוח המתוכנן, במודל SCS קיימות שלוש טבלאות עבור ערכי CN, כל טבלה מייצגת אופי שטח שונה. הטבלאות היינן עבור "שטחים עירוניים", "שטחים חקלאיים" ו"שטחים צחיחים עד צחיחים למחצה" (TR-55, 1986). מתוך שלושת טבלאות אלה זו המייצגת את השטח שיפותח בגבעת זמר הינה טבלת ה"שטחים העירוניים".

לאחר מכן יש לבחור את אופי הקרקע המייצגת את האזור. תאי הכרמל המערבי והמזרחי שייכים לאקוויפר חבורת יהודה. גרינבאום וחובריו (2006) מצאו באגן נחל אורן הממוקם בכרמל המערבי כי נוצר נגר באגן רק לאחר שירדו כמות משקעים בעובי הנע בין 120 ל-150 מ"מ, כמו כן, גרינבאום וחובריו (2007) מצאו כי ערכי החדור האופקי של התא המערבי של אקוויפר הכרמל נעו בין 0.76 ל-6.4 מטר לשעה. בשל הסידוק האינטנסיבי בסלע נוצר קשר הידראולי מלא בין שכבות האקוויפר השונות ותת-האגנים ועל כן יש להתייחס לכל החתך הקרבונטי של חבורת יהודה בכרמל כאל אקוויפר אחד (גוטמן, 1998). מתוך ערכים אלו בלבד לא ניתן למצוא מהם ערכי החדור האנכי הנדרשים לשיוך הקרקע לאחת מארבע "קבוצות הידרולוגיות" המופיעות בשיטת SCS אך ניתן להעריך כי ערכים אלו גדולים מ-7.6 מ"מ לשעה כך שניתן לשייך את סוג הקרקע לקבוצה A.

במודל SCS לא ניתן ביטוי לשיפוע הקרקע בבחירת ערך ה-CN עבור חישוב נפחי נגר, אם כי נעשו מספר מחקרים אשר ניסו לתת ביטוי לשיפוע בבחירת ערך CN. Hawkins et al. (2009) בסיכומם הביקורתי על שיטת SCS מצטטים מחקרים אשר מצאו כי ערך ה-CN גדל בערך של 0.25 עד 0.9 למעלת שיפוע ולעומתם מחקרים אחרים אשר מצאו כי הערך יורד ב-1.3 למעלה של שיפוע האגן בהסתמך על המאמרים של Arnold & Williams (1995) ו-Garg et al. (2003).

כיוון שעליה בערך ה-CN משקפת עליה ביכולת יצירת הנגר של תכסית הקרקע, אין זה סביר שעליה בשיפוע הקרקע אשר מעלה את מהירות המים ולכן מורידה את הזמן בו הם יכולים לחדור תת-האגן להקטנתו של CN כפי שטוענים Garg et al (2003), אלא תעלה, בהתאם למסקנותיהם של Arnold (1995) ו-Williams. ענבר וחובריו (2007) בחוקרם את תגובות הנגר לאירועי גשם בחמישה אגני היקוות באזור הכרמל לא מצאו קשר בין שיפועי האגנים השונים ליחס בין נפח הנגר לנפח הגשם. במחקר זה הוחלט לא לתת ביטוי לשיפוע הקרקע בקביעת ערך ה-CN.

ערך ה-CN אשר נבחר לייצג את הקרקע הטבעית באזור ולאחר מכן את פוליגוני ה"אזור טבעי" במודל המבוזר הינו 39, בהתאם להגדרת טבלת מקדמי ה-CN עבור קרקע מסוג A:

.Open space (lawns, parks, etc.) – Good conditions (grass cover > 75%)

עבור פוליגוני שטחים ציבוריים פתוחים נבחר הערך 49 מתוך הטבלה. ההתייחסות לשטחים אלו הינה כאל שטח טבעי אשר למרות שהינו מאופיין כחדיר, במהלך בנייתו עבר הידוק ולכן ערך המקדם גבוה במידת מה מזה של השטח הטבעי.

ערך ה-CN עבור שאר סוגי שימושי הקרקע המיוצגים כפוליגונים, כביש, בניין ציבורי, מגורים, חנויות מלאכה ומוסכים, תלוי באחוז השטח האטום מתוך סך המגרש עבור כל שימושי הקרקע וכיצד שטח אטום זה מתנקז מתוך המגרש. בכל הפוליגונים בשכונה מלבד פוליגוני הכביש ושטחים ציבוריים פתוחים, אחוז השטח האטום הינו 85 מסך שטח המגרש (אלון, מידע בע"פ).

עבור פוליגוני הכביש חושב באמצעות משוואה 4.5 הערך 95:

$$CN_c = 89 + \left(\frac{65}{100} \right) (98 - 89) (1 - 0.5 \times 0) = 95$$

כיוון שעל פי הנספח הנופי המצורף לתוכנית הפיתוח שהתקבלה מן העירייה הוגדר כי "המדרכות ירוצפו באבן משתלבת או חומר אחר בתיאום ובאישור משרד מהנדס העיר" (ברקן-אלחייני, 2009), המדרכות מהוות כ-35% מסך שטח הכביש (מפות מעיריית חיפה), ערך ה-CN עבור משטח אבן משתלבת הינו 89 ו-R, היחס בין השטח האטום המקוטע מסך השטח האטום, הינו אפס, כלומר השטח הנדון הוא רציף ולא מקוטע.

בהנחיות לניקוז המגרשים בנספח הנופי המצורף לתוכנית הפיתוח (ברקן-אלחייני, 2009) מוגדר כי פני השטח במגרשי המבנים יהיו משופעים בכ-2% על מנת להבטיח הרחקת מי הנגר מהמבנה. כמו כן, בחזית המגרשים מוגדר כי יש לבנות ערוגה שתשמש רצועת הפרדה בין המגרש לבין הרחוב. ניתן להסיק מכך שמי הנגר אשר יוצרו בחלק האטום של מגרשים אלו, יובלו לאזור חדיר כך ש-R, היחס בין השטח האטום המקוטע מסך השטח האטום (משוואה 5.2), הינו 1.

על מנת ליצור ערך CN שונה עבור פוליגוני "בניין ציבורי", "מגורים" ו-"חנויות מלאכה ומוסכים" ובהסתמך על מגבלותיה של שיטת SCS, המאפשרת למתכנן חופש פעולה מסוים במהלך בחירת ערכים אלו: הוחלט כי לכל אחד משלושת פוליגונים אלו יינתן ערך R שונה, על מנת להדגים את האפשרויות השונות של תכנון תכסיות הקרקע במגרשים שונים. ערכים אלו מובאים בטבלה 12.

עבור השטחים החזירים בתוך כל המגרשים נבחר ערך CN של שטחים ציבוריים פתוחים, 49. ערכי המקדם המשולב המחושב, CN_c , מופיעים בעמודה השמאלית.

CN_c	CN_p	R	P_{imp}	
70	49	1	85	מגורים
80	49	0.5	85	בניין ציבורי
90	49	0	85	חנויות מלאכה ומוסכים

טבלה 12 - ערכי CN_c שישומו עבור המגרשים השונים

Table 12 – CN_c values for different land uses

הגדרת חלופות נוספות – תוספת מתקנים לניהול הנגר

בנוסף לחלופות לעיל הוצעו שתי חלופות המתבססות על התוכניות האלו, המאושרת והמוצעת – חלופות 1 ו-2, בהתאמה – ע"י תוספת מתקנים לניהול הנגר לכל אחת מהן. החלופות הללו יסומנו א1 ו-א2, בהתאמה.

אי לכך, יושוו בסה"כ ארבע חלופות:

חלופה 1: התוכנית המאושרת;

חלופה א1: התוכנית המאושרת לאחר שהוספו לה מתקנים לניהול הנגר;

חלופה 2: תוכנית מוצעת, אשר תוכננה בהתאם לעקרונות תר"מ;

חלופה א2: תוכנית מוצעת משולבת עם מתקנים לניהול הנגר.

5.2 בחירת מתקנים לניהול נגר

המונח "מתקנים" מקיף אמצעים לשינוי תכסיות בשכונה, שישנו את מהלך הנגר בשכונה עצמה וישפיעו ומבנים המיועדים לקלוט את הנגר סמוך למוצא השכונה, להשהותו, לאוגרו ו/או לשחררו בצורה מבוקרת יותר למורד. המטרה של כל האמצעים הינה להקטין את נפחי וספיקות הנגר במוצא השכונה. חישוב ספיקת השיא ונפחי הנגר נעשה עבור מתקנים אשר משפיעים על תכסית הקרקע, ולכן השפעתם תתבטא בחישוב נפחי הנגר, ולמתקנים אשר משפיעים על זמן הריכוז והשהיית הנגר במוצא האגן ולכן השפעתם תתבטא בחישוב ספיקת השיא.

בחירת מתקני ניהול הנגר אשר ישולבו בתכנון השכונה נעשתה מתוך התחשבות בשני גורמים: (א) הנוף השכונתי – שילוב המתקנים לא יפגע בנוף השכונתי, ובאם יתאפשר אף יתרום לו. דוגמא לכך ניתן לראות בגגות ירוקים, אשר מעבר לתרומתם לצמצום נפחי הנגר יהוו שיפור חזותי לנוף המשתקף

משכונת מגורים במעלה. (ב) שטח זמין – הצבת מתקנים בשטח השכונה לא תבוא על חשבון שטחי הפיתוח השונים, מגורים כבישים, אזורים חנויות מלאכה ומוסכים וכ"ו, דוגמא לכך ניתן לראות במתקני האגירה והשהייה תת קרקעיים.

המתקנים אשר נכללו בחלופות הנבחנות כוללים:

- גגות ירוקים
- משטחים חדירים
- תעלות עשב לאורך הכבישים
- מתקן אגירה תת קרקעי
- מתקן השהייה תת קרקעי

מתקן האגירה יוצב בסמוך לנקודת ניקוז האגן, ותפקידו להפחית את ספיקת השיא כך שתהייה שווה לספיקת השיא המחושבת במצב הטבעי של האגן, על ידי אגירת נפחי מים העודפים. נפח המאגר הדרוש מתקבל מהפרש בין ההידרוגרמה המייצגת את השטח לפני פיתוחו ולאחר פיתוחו, כפי שיפורט בהמשך. גם מתקן השהייה הוצב בסמוך לנקודת ניקוז האגן ותפקידו זהה, הפחתת ספיקת השיא עד לערך המחושב לפני הפיתוח, אלא שמתקן זה גם משחרר מים בספיקות ממותנות. דרך פעולתו והחישובים אשר נעשו לבחור את גודלו יפורטו בהמשך.

ניתן ורצוי לשלב מתקנים נוספים בשכונה כגון קופסאות עצים, תעלות חדור ומתקנים נוספים אשר הזכרו בסקירת ספרות ופעולות תר"מיות בדומה לאלו שמציינת שרון כץ בעבודתה (2001) כגון בניית חומה המקיפה את המגרש וניקוז מרזב הגג אל שטחים חדירים בגינה אך חישוב השפעתם קשה יותר לכימות ולכן לא התייחסנו עליהן במהלך החישובים.

בחלופות 1א ו-2 ישנן תעלות הממוקמות בין מגרשי המגורים והכביש אשר קולטות את הנגר הנוצר במגרשי המגורים ומוליכות אותו אל שטחים חדירים במורד, זאת בניגוד לחלופות 1 ו-2 אשר בהן מרבית הנגר הנוצר ממגרשי המגורים מובל אל הכביש. תעלות אלה מהוות מתקן ניהול נגר אשר הוחלט להתייחס אליהן כפוליוגון של שטח חדיר בעל כושר חלחול ללא כושר אגירה, בעל מקדם 49.

ערכי CN עבור מתקנים לניהול נגר

שילוב מתקנים לניהול הנגר במודל SCS אפשרי על ידי שני מנגנונים. מנגנון אחד מתייחס למתקן עם אוגר, הקולט את הנגר מן המעלה שחושב במודל הרגיל, אוגר אותו ו/או משחרר אותו בצורה מבוקרת למורד. הנגר היוצא מהמתקן מחושב על פי המשתנים ההנדסיים המאפיינים את המתקן. המנגנון השני

מייחס לכל מתקן ערך CN אשר נכלל בשקלול ערך ה-CN הסופי של השטח, וזאת כאשר למתקן לא ניתן לייחס אוגר.

מלבד מאגרים (ponds) ואגנים ירוקים אשר שילובם מתאפשר רק על ידי שימוש במנגנון הראשון, ניתן לבחור עבור כל מתקן אחד משני המנגנונים בהתאם לנוחיות המתכנן (Weinstein, 2009).

על מנת לחשב את השפעת שילוב המתקן "גגות ירוקים", אשר ערך ה-CN שלו כאשר שיפועו אינו עולה על 2% הינו 84 (Getter et al, 2007), במגרשי המגורים, הבניינים הציבוריים, החנויות ובתי המלאכה מחושב ערך CN משוקלל על ידי הכפלת ערך כל CN בחלקו היחסי בשטח המגרש. במקרה זה הערך המתקבל הינו CN=70 עבור כל המשטחים כיוון שלכל השטחים הללו אותו יחס בין השטח המפותח לבלתי מפותח.

$$CN = 84 \times 0.85 + 49 \times 0.15 = 70$$

כיוון ששיטה זו להערכת ה-CN אינה מביאה לידי ביטוי את השוני בין שימושי הקרקע במגרשים השונים הוחלט להשתמש במשוואה 4.5 כאשר במקום הערך 98 אשר מבטא את ערך ה-CN של שטח אטום, במקרה זה משטח של גג, יוצב הערך 84 אשר מייצג "גגות ירוקים". מתקבלת משוואה 5.2.

$$(5.2) \quad CN_c = CN_p + \left(\frac{P_{imp}}{100} \right) (84 - CN_p) (1 - 0.5R)$$

עבור כביש בנוי ממשטח חדיר ניתן לבחור בערך CN של 89 (Bean et al, 2007b).

הערכים אשר התקבלו הינם:

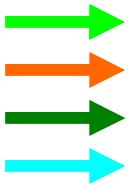
CNc	CNp	R	Pimp	
64	49	1	85	מגורים
71	49	0.5	85	בניין ציבורי
79	49	0	85	חנויות מלאכה ומוסכים
89	כביש בעל תכסית חדירה (Bean et al, 2007b).			

טבלה 13 - קביעת ערכי מקדם CN_c לשימושי הקרקע השונים

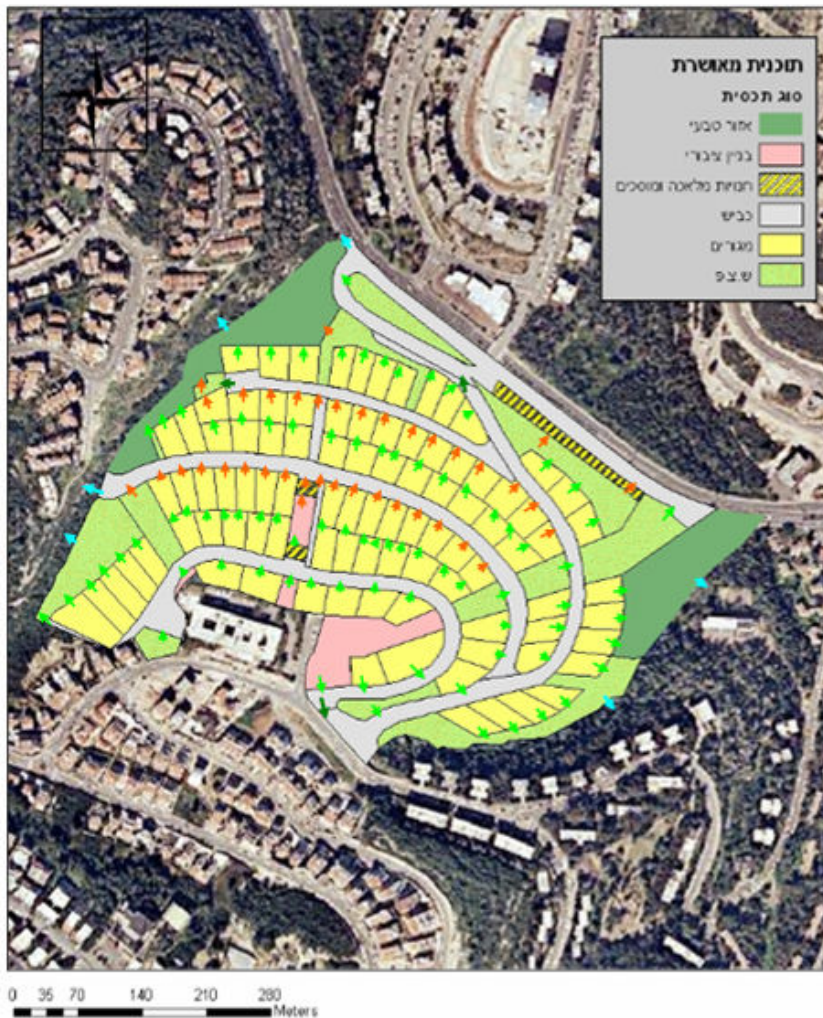
Table 13 – Choosing CN_c values for different land uses

5.2.1 חישוב נפחי הנגר

לחישוב נפחי הנגר שימש המודל המבוזר. עבור כל תוכנית פיתוח נוצרה רשת זרימה בין הפוליגונים, כאשר כיווני הזרימה בין פוליגונים שכנים נקבעו על פי נתוני הגבהים. באיורים 24 ו-25 ניתן לראות את שתי התוכניות, המאושרת והמוצעת, כאשר חיצים מתארים את כיווני הזרימה. משמעות צבעי החיצים:



- זרימת נגר בין פוליגון אשר אינו מקבל נגר מהמעלה לפוליגון תחתון
- זרימת נגר בין פוליגון המקבל נגר מהמעלה לפוליגון תחתון
- זרימת נגר לפוליגון מסוג כביש
- זרימת נגר מפוליגון אל מחוץ לתחום השכונה



איור 24 – רשת הזרימה בתוכנית המאושרת (חלופות 1 ו-1א)

Figure 24 – Flow network in the Approved Plan (Alternatives 1 and 1a)



איור 25 - רשת הזרימה בתוכנית המוצעת (חלופות 2 ו-2א)

Figure 25 - Flow network in the Proposed Plan (Alternatives 2 and 2a)

חלופה 1 תוכנית מאושרת		חלופה 2 תוכנית מוצעת		
CN	אחוזים	CN	אחוזים	סוג
39	10	39	24.2	אזור טבעי
80	3.5	80	3.6	בניין ציבורי
90	1.4	90	1.4	חנויות מלאכה ומוסכים
95	22.8	95	20.4	כביש
70	45.1	70	44.6	מגורים
49	17.3	49	5.8	ש.צ.פ
69.6	100.0	67.1	100.0	סך הכל ומקדם משוקלל
חלופה א1		חלופה א2		
CN	אחוזים	CN	אחוזים	סוג
39	10	39	24.2	אזור טבעי
71	3.5	71	3.6	בניין ציבורי
79	1.4	79	1.4	חנויות מלאכה ומוסכים
89	22.8	89	20.4	כביש
64	45.1	64	44.6	מגורים
49	17.3	49	5.8	ש.צ.פ
65.1	100.0	62.7	100	סך הכל ומקדם משוקלל

טבלה 14 - אחוזי השטחים של שימושי הקרקע בשכונה, מקדמי CN ומקדם משוקלל לשכונה, עבור התכנית המאושרת (חלופות 1 ו-1א) והתכנית המוצעת (2 ו-2א) בלי ועם מתקנים לניהול הנגר

Table 14 – Percentage of land uses in the neighborhood, CN coefficients, and weighted coefficient for the neighborhood, for the Approved Plan (Alternatives 1 and 1a) and the Proposed Plan (Alternatives 2 and 2a) without and with BMPs

בכל שימושי הקרקע מלבד "אזור טבעי" ו"שצפ"ים" אין הבדל ניכר בשטח בין התוכנית המוצעת לתוכנית המאושרת. סך השטח החדיר (אזור טבעי ושצפ"ים) דומה בשתי התוכניות ועומד על כ-62.6 דונם בתוכנית המאושרת ועל כ-69 דונם בתוכנית המוצעת (ההפרש נובע משינוי שטח הכבישים, כאמור לעיל). גם המקדם המשוקלל בשתי התוכניות ללא מתקנים דומה ועומד על 69.6 בתוכנית המאושרת ועל 67.1 בתוכנית המוצעת ואילו בתכניות עם מתקנים לניהול הנגר המקדמים 65.1 עבור התוכנית המאושרת ו-62.7 עבור התוכנית המוצעת.

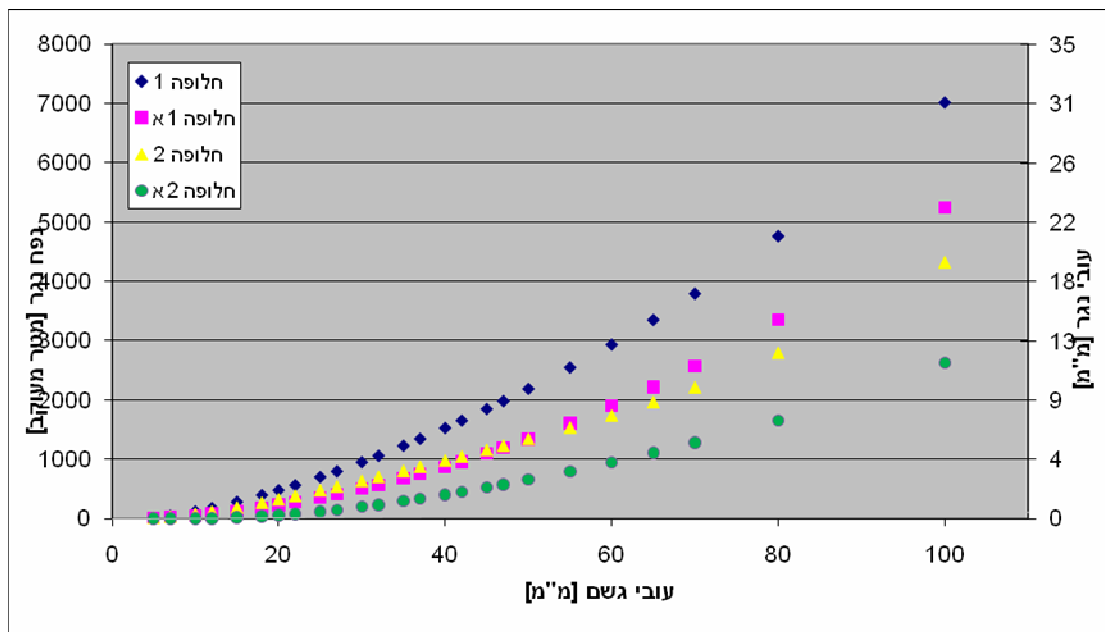
ההשוואה בין פוטנציאל ייצור נפח הנגר בין ארבע החלופות התכנוניות (מאושרת ומוצעת, בלי ועם מתקנים) נעשתה על ידי שימוש בסופות המייצגות את טווח עובי גשם באזור, כפי שפורט בפרק 4. טווח העוביים של סופות אלו מתבסס על נתונים אשר נלקחו מאתר האינטרנט של השרות המטאורולוגי מתחנת גשם המוצבת בנמל חיפה (שרות מטאורולוגי, קישור), נתונים אלו, המופיעים בטבלה 14, הינם כמות הגשם היומית המרבית עבור כל אחד מן החדשים, לתקופה מאז ב-1952. עובי הגשם השנתי הממוצע בתחנה זו הוא 540 מ"מ.

חודש	ינואר	פבר'	מרץ	אפר'	מאי	יוני	יולי	אוג'	ספט'	אוק'	נוב'	דצמ'
עובי גשם יומי מרבי תחנת הגשם נמל חיפה (מ"מ)	77.3	60	32.4	57.2	9.4	9.2	19.1	0.6	14.9	49.4	75.2	90

טבלה 15 - עובי גשם יומי מרבי בחודש, תחנת המדידה בנמל חיפה. לתקופה מאז 1952

Table 15 – Maximum daily runoff depth for each month, Haifa Port rainfall station, measurements taken since 1952

כמו כן, נערכו החישובים באמצעות נתוני גשם יממתי בתחנת מדידה בטכניון בשלוש השנים 2001/2, 2002/3 ו-2003/4



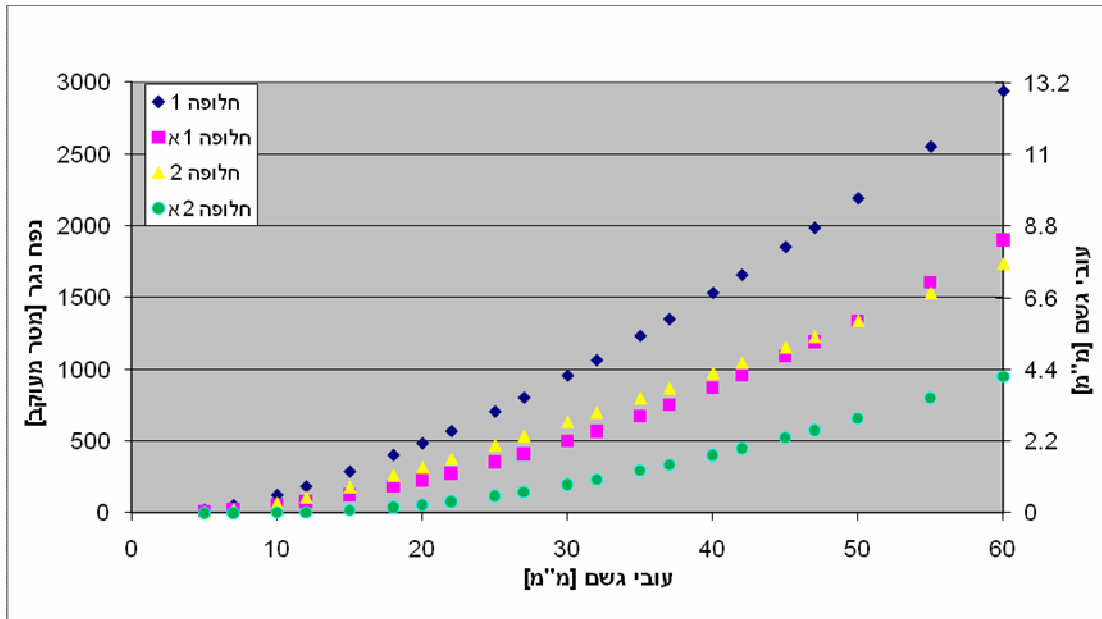
איור 26 - נפח הנגר במוצא השכונה בארבע חלופות התכנון עבור סופות עד 100 מ"מ

Figure 26 – Flow volume at the neighborhood's outlet for four Planning Alternatives for storms of up to 100 mm

5.2.2 נפחי נגר במוצא השכונה

באיורים 26 ו-27 נתונים ערכי נפח הנגר הנוצר במוצא הניקוז של השכונה ששטחה 229.6 דונם, מסופות בעלות עובי שונה, בתחום עד 100 מ"מ. איור 27 מוגבל לתחום עד 60 מ"מ, שאלו הסופות השכיחות יותר, על מנת להקל על קריאת הערכים. מתוך התבוננות באיורים אלה ניתן לערוך השוואה בין ארבע החלופות, כלהלן:

- חלופה 2 (שינוי שימושי הקרקע) לעומת חלופה 1: נפחי הנגר הסופתי בחלופה 2 קטנים מאלו של חלופה 1, בשיעור של כ-40% עבור כל ערכי עובי הגשם.
 - חלופה 1א, הוספת מתקנים, לעומת חלופה 1: הוספת המתקנים מקטינה את נפחי הנגר הסופתי בשיעור משתנה בין כ-60% בעובי גשם נמוך וכ-25% בעובי גשם גבוה.
 - חלופה 2א, הוספת מתקנים, לעומת חלופה 2: הוספת המתקנים מקטינה את נפחי הנגר הסופתי בשיעור אפסי בעובי גשם נמוך ולערך של כ-50% בעובי גשם גבוה.
 - חלופה 2א לעומת חלופה 1, שינוי שימושי הקרקע ותוספת מתקנים: שינוי שימושי הקרקע ותוספת מתקנים מקטינים את נפח הנגר הסופתי בשיעור אפסי בעובי גשם נמוך ולערך של כ-60% בעובי גשם גבוה.
 - חלופה 1א לעומת חלופה 2: באיור 27 ניתן לראות כי מתחת לעובי גשם של כ-50 מ"מ חלופה 1א מייצרת קצת פחות נגר מחלופה 2, ואילו מעבר ל-50 מ"מ הסדר מתהפך. ניתן להבין תופעה זו מן השיקול הבא: בחלופה 1א הפחתת הנגר מבוצעת על ידי מתקנים, ואלו מסוגלים לטפל בכמויות גשם קטנות יחסית. מאידך, הקטנת הנגר בחלופה 2 מתקבלת באמצעות שינוי מיקומם של שימושי הקרקע כך שנגר המתקבל מתכסיות אטומות יחסית מובל אל תכסיות חדירות יותר וחוזר שם. אפקט זה ניכר יותר בעוצמות גשם גבוהות.
- בכדי לבחון את השפעת החלופות התכנוניות על סה"כ כמות הנגר השנתית נעשה שימוש בנתוני סופות של שלוש שנים - 2001/2 עד 2003/4. אלו נלקחו מנתוני עובי גשם יומי אשר נמדדו בתחנת הגשם קריית הטכניון, הנמצאת במרחק לא רב מאתר השכונה. נתוני הגשם היממתי הוכנסו לתוך מודל SCS המבזר עבור ארבעת החלופות. התוצאות מרוכזות בטבלה 15, בה מופיע סה"כ נפח הנגר השנתי המצטבר עבור כל חלופה.



איור 27 - נפח הנגר במוצא השכונה בארבע חלופות התכנון עבור סופות עד 60 מ"מ

Figure 27 - Flow volume at the neighborhood's outlet for four Planning Alternatives for storms of up to 60 mm

סה"כ נפח הנגר השנתי [מ"ק]				נפח גשם שנתי [מ"ק]	עובי נגר, כאחוז מתוך ממוצע עובי גשם שנתי	עובי גשם שנתי [מ"מ]	שנים
תוכנית מוצעת		תוכנית מאושרת					
חלופה 2א, עם מתקנים	חלופה 2, ללא מתקנים	חלופה 1א, עם מתקנים	חלופה 1, ללא מתקנים				
1,502	3,885	4,347	6,996	76,583	61.7	333.6	2001/2
2	5.1	5.7	9.1	נפח הנגר כאחוז מנפח הגשם (%)			
1102	3139	3674	5887	62,612	50.4	272.7	2002/3
1.8	5	5.9	9.4	נפח הנגר כאחוז מנפח הגשם (%)			
1677	4393	5261	8229	65,689	52.9	286.1	2003/4
2.6	6.7	8	12.5	נפח הנגר כאחוז מנפח הגשם (%)			
4271	11417	13282	21112	204,884	892.4	סה"כ ל-3 שנים	
2.1	5.6	6.5	10.3	נפח הנגר כאחוז מנפח הגשם (%)			

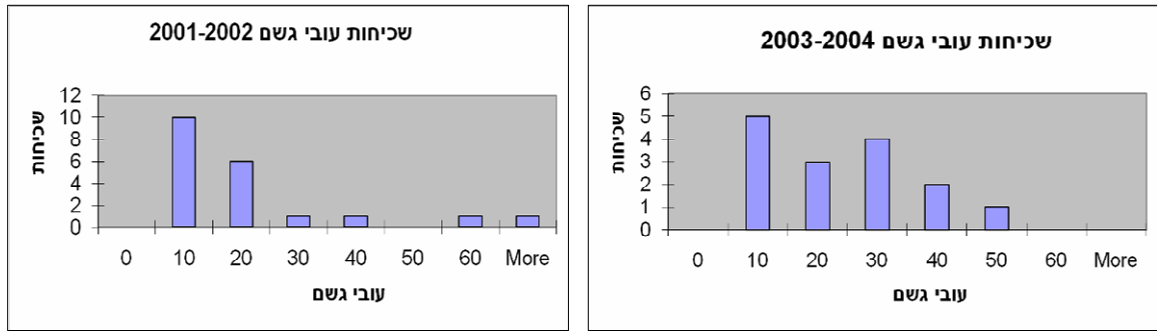
(1) שטח השכנה 229.6 דונם (2) עובי הגשם שנתי ממוצע 540 מ"מ.

טבלה 16- נפח שנתי מצטבר של גשם ונגר במשך 3 שנים עבור ארבע החלופות

Table 16 – Cumulative annual rain and runoff volumes for 3 years for the four Alternatives

ניתן לראות כי חלופה 1 מייצרת את נפח הנגר המצטבר הגדול ביותר וכי חלופה 2א מייצרת את נפח הנגר המצטבר הקטן ביותר, היחס בין הנגר השנתי המתקבל עבור חלופה 2א ביחס לחלופה 1 נע בין כ-21.5 אחוז ל-18 אחוז. הדבר תואם את התוצאות באיורים 26 ו-27, בהם עבור כל עובי גשם חלופה 1 מייצרת יותר נפח נגר מחלופה 2א. יחס הנגר השנתי בין חלופה 2 לחלופה 1א עבור שנים אלו נע בין 89 אחוז ל-83 אחוז, יחס זה הינו תוצר של עובי הגשם היומי בסופות הנמדדות אשר היה נמוך ברובו המכריע מערך הסף בו חלופה שלוש מייצרת יותר נפח נגר.

כמו כן ניתן לראות כי נפח הנגר הרב ביותר מתקבל בשנת 2003/4 עבור כל החלופות למרות שבשנים 2001/2 נמדד עובי הגשם השנתי גדול בכ-9% ביחס לממוצע הרב-שנתי. תוצאה זו מוסברת בשכיחות עובי הסופות בשנים אלו: בשנת 2001/2 נמדדו 4 סופות בעובי גשם הגדול מ-20 מ"מ ואילו בשנים 2003/4 נמדדו 7 סופות בעובי גדול מ-20 מ"מ, כפי שניתן לראות באיור 28.



איור 28 - שכיחויות עובי גשם בסופות נמדדות עבור השנים 2001/2 ו-2003/4.

Figure 28 – Frequency of measured rainfall thickness for the years 2001/2 -2003/4

5.2.3 ספיקות שיא ומתקנים למיתון ספיקות במוצא מן השכונה

חישוב ספיקת השיא נעשה באמצעות השיטה הרציונלית. הנתונים הדרושים הינם שטח האגן, מקדם הנגר ועוצמת גשם עבור תקופת החזרה הנבחרת. שטח האגן נמדד באמצעות תוכנת GIS והוא זהה עבור כל תוכניות הפיתוח. בחירת מקדם ספיקת הנגר נעשתה בהתבסס על 9. כיוון שבכל התוכניות נשמר אחוז התכסיות החדירות והאטומות נבחר ערך זהה עבור שתי התוכניות. בטבלה 9 ערך מקדם הנגר עבור שטח עירוני נע בין 0.5 ל-0.95. הערך שבחרנו עבור גבעת זמר הוא 0.8, המתאים לצפיפות בנייה בינונית ושיפוע גבוה יחסית.

לצורך חישוב עוצמת הגשם נמדדה הדרך הארוכה ביותר שהנגר יעבור באגן ושיפוע דרך זו באמצעות תוכנת GIS. בהתבסס על ערכים אלו חושב זמן ריכוז האגן עבור תוכניות הפיתוח השונות על ידי שימוש במשוואה 4.11: 14.18 דקות לחלופה 1, 25.15 דקות לחלופה 2 ו-10.73 דקות עבור האגן במצבו הטבעי, הם מופיעים בטבלה 16, בטבלה זו מופיעה עוצמת הגשם המייצגת כל חלופה עבור מספר תקופות חזרה, 1 ל-10 שנים, 5 שנים ו-3 שנים. זמן הריכוז בחלופות התכנוניות ארוך יותר מאשר במצב הטבעי משום שבהן הנגר מוסע לאורך מסלול ארוך של הכביש.

בתמ"א 34 ב/3 - בנספח מנחה א', סעיף 2.6, עמוד 12 - מופיעה טבלת תקופות חזרה עם ההנחיה "חישוב ספיקת התכן בעורקים שבתחום התכנית יתבסס על הטבלה הבאה או על פי עדכונים כפי שיעודכנו מעת לעת על-ידי נציב המים". השורה המתאימה לשכונה נקראת "שטחים מבונים (רחובות, מגרשי חניה, חצרות בתים וכיו"ב)" והערכים המתאימים שם הם "תקופת חזרה בשנים - 5 עד 50" ובהתאמה "הסתברות מרבית בשנה מסוימת - 20% עד 2%".

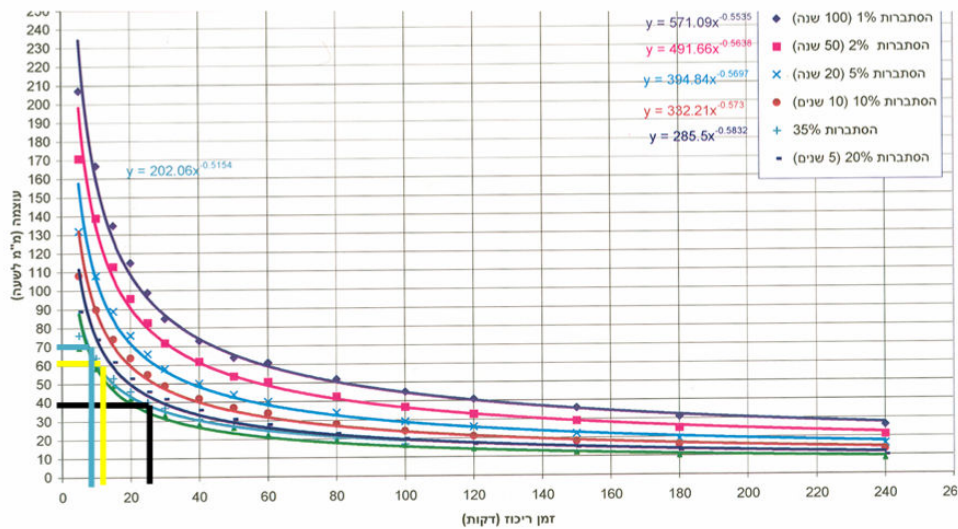
	חלופה 2 תוכנית מוצעת	חלופה 1 תוכנית מאושרת	לפני פיתוח
Length [m]	2300	1400	1100
Slope [m/m]	0.043	0.071	0.091
[min] t_c	25.15	14.18	10.73
C	0.8	0.8	0.4
I_{10} [mm/h]	50.8	70.5	82.7
I_5 [mm/h]	43.5	60.7	71.5
I_3 [mm/h]	38.3	51.5	59.5
Q_5 [mm/sec]	2.22	3.10	1.82

טבלה 17 - זמן ריכוז במצב הטבעי ועבור שתי תכניות הפיתוח לתקופת חזרה שונות, 10,5 ו-3 שנים וספיקת השיא עבור תקופת חזרה של 5 שנים.

Table 17 – Concentration time for the undeveloped basin and the two development plans for different return periods, 3,5 and 10 years and maximum runoff flow rates for return period of 5 years

בהתייעצות עם מהנדסי ניקוז (ליבנה, ידע אישי; רימר, ידע אישי) הוחלט לבחור בתקופת חזרה של 5 שנים (הסתברות 20% בשנה), אשר מקובלת עבור שטחים עירוניים. בתוכנית אב לניקוז של עיריית חיפה (אוגוסט 2003) נכתב כי עבור שטחים משופעים ושכונות מגורים יש לתכנן את מערכות הניקוז עבור תקופת חזרה של 5 שנים. עוצמת הגשם המייצגת את זמן הריכוז שחושב עבור החלופות השונות חולצה מתוך איור 17. הנתונים ותוצאות החישוב עבור התוכנית המאושרת, התוכנית המוצעת והאגן במצבו הטבעי מובאים בטבלה 16. ערכי ספיקת השיא Q_5 בתחתית הטבלה הינם לתקופת חזרה של 5 שנים. שאר הערכים מופיעים בטבלה לצורך התרשמות ביחס להשפעת קביעת תקופת החזרה על עוצמת הגשם לתכנון.

באיור 29 ניתן לראות את בחירת עוצמת הגשם לתכנון על עקומת הסתברות 20% (5 שנים) בהתאם לזמני הריכוז. הקו הכחול מייצג את השכונה במצבה הלא מפותח, הקו הכחול עבור חלופה 1 והשחור עבור חלופה 2. הערכים חושבו באמצעות הנוסחה המופיעה בחלקו הימני העליון של האיור.



איור 29 – מציאת עוצמות הגשם המתאימות לזמני הריכוז בשתי תכניות הפיתוח עבור חישוב באמצעות השיטה הרציונלית: בצהוב 14.18 דקות (חלופה 1), בשחור – 25.15 דקות (חלופה 2), בכחול – 10.73 דקות למצב הטבעי. (הערכים חושבו מן המשוואות; הגרפים אינם מדויקים דיים, וניתנו כאן על מנת לתת התרשמות של שינויי העוצמה הגדולים עבור ערכים נמוכים של זמן הריכוז).

Figure 29 – Finding rainfall intensity corresponding to the concentration times in the two development plans for use with the Rational Method

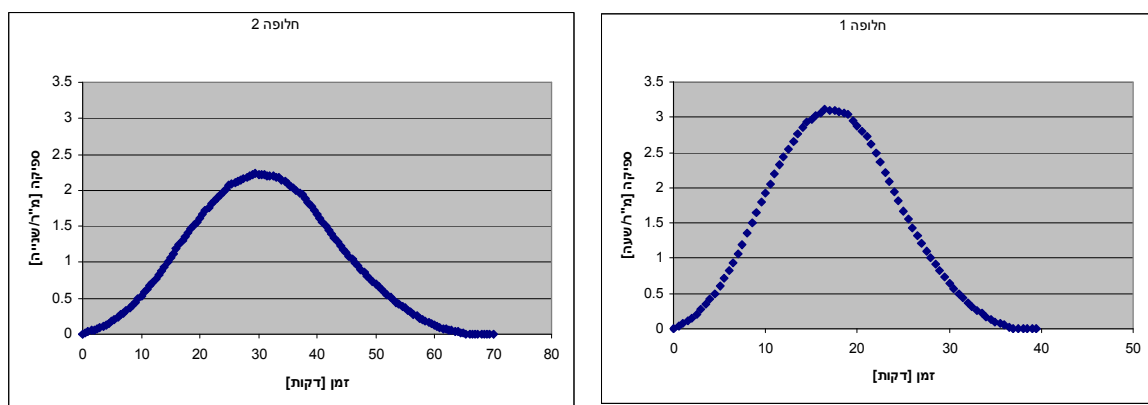
בחלופות התכנון 1 ו-2 נבחן שילוב של שני מתקנים לניהול הנגר שמטרתם להקטין את ספיקת השיא – מתקן השהייה ומתקן אגירה - כל אחד לחוד. מימדי המתקנים חושבו כך שיהיו אופטימאליים (ראה להלן) אך כיוון שכל תוכנית פיתוח מייצרת ספיקת שיא שונה, לא ניתן היה לבחור מתקן אחד אשר מאפייני הנפח וגודל פתח ניקוז יהיו אופטימאליים עבור שתי תוכניות הפיתוח. לכן, במקום להשוות את ספיקות השיא בין תוכניות הפיתוח עבור אותם מתקנים חושבו עבור כל תוכנית מימדי המתקנים אשר יגרמו להשוות את ספיקת השיא לזו אשר הייתה קימת טרם הפיתוח, ואז להשוות בין מימדי המתקנים עבור התוכניות השונות. כל סוג מתקן הושווה בנפרד, כלומר נעשתה השוואה לחוד בין המתקנים השונים ולא בדיקת השפעתם כאשר משולבים שניהם בטור. מיקום המתקנים הינו בחלקו התחתון של האגן, בצידו השמאלי של הכביש הצפוני, שהוא מוצא האגן.

מבנה מתקני אגירה והשהייה דומה זה לזה, וניתן לראות דוגמא למיבניהם באיור 3. ההבדל בין מתקן השהייה ומתקן אגירה במקרה זה מתייחס לשחרור המים מתוך המתקן: במתקן השהייה הנגר נכנס למתקן, מתווסף בו ויוצא דרך פתח המותקן בצידו המורדי, ואילו במתקן אגירה אין פתח יציאה/שחרור בנוי, אלא הנגר שנאסף נאגר לצורך שימוש בו (אם יש), מתאדה ו/או מחלחל דרך תחתיתו החדירה.

כיוון שאין בידינו סקר גיאולוגי או נתונים אחרים אשר יקבעו מגבלות למרחב בו ניתן להתקין את המתקנים, הוחלט כי בסיס המתקן יהיה ריבוע וגובהו יהיה שווה למחצית שטח הבסיס, שימוש ביחס זה הינו מספק לצורך חישוב עקרוני במקרה זה סביר ונראה כי במציאות יחס זה לא יכבול את המתכננים. במהלך חישוב מתקן ההשהייה גודל חלל אחסון המים היווה את המשתנה אשר את ערכו יש להביא למינימום בכפופות לאילוץ על הנפה הדרוש, מתוך הנחה כי משתנה זה ביותר מבטא את עלות התקנת המתקן. עבור שני סוגי המתקנים נעשה החישוב בהנחה שהמתקנים ריקים בתחילת קבלת הנגר, עבור מתקן ההשהייה הריקון לאחר סופה מתבצע על ידי יציאת המים מפתח הניקוז ועבור מתקן האגירה על ידי חלחול המים דרך קרקעית חדירה.

חישוב נפחי מתקני האגירה

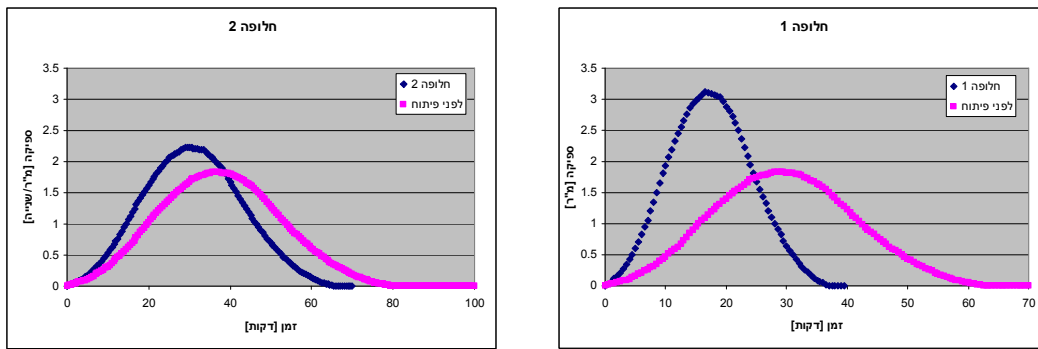
ייעודו של מתקן אגירה הינו לאחסן נפחי מים, במקרים מסוימים למטרה עיקרית של שימוש מאוחר יותר אך במקרה זה על מנת להכיל את נפח הנגר העודף ביחס לנפח הנגר המתקבל באגן טרם פיתוחו כך שספיקת השיא לא תעבור על הערך המחושב עבור מצבו הטבעי של האגן.



איור 30 - הידרוגרמות עבור חלופה 1 (מימין) וחלופה 2 (משמאל)

Figure 30 – Hydrographs for Alternatives No. 1 (right) and No. 2 (left)

לצורך כך נבנו ההידרוגרמות המיצגות את התנהגות האגן עבור אירועי הגשם אשר נבחרו לצורך חישוב ספיקת השיא, פרוט השיטה בפרק 4.4.1 שלעיל (Sherman, 1932). עבור התוכנית המאושרת עוצמת הגשם אשר נבחרה לחישוב ספיקת השיא בהתאם לשיטה הרצינאלית הינה 60.73 מ"מ לשעה ועבור התוכנית המוצעת 43.46 מ"מ לשעה. לאחר מכן נבנו הידרוגרמות אשר יניבו ספיקת שיא השווה לערך הקיים לפני הפיתוח והוצבו בסמוך להידרוגרמות באיור 30, כפי שניתן לראות באיור 31.



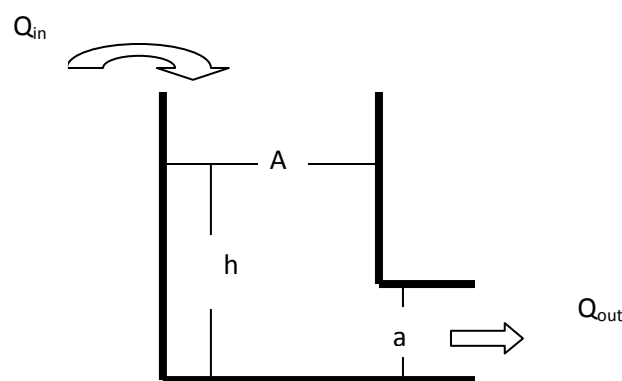
איור 31 - השוואת הידרוגרמות בין מצב לא פותח לבין שתי החלופות לצורך קביעת נפח מתקן אגירה.

Figure 31 – Comparison between hydrographs of developed and undeveloped basins for the two alternatives - for determining the volume of the storage facility

השטח מתחת להידרוגרמות, אשר מציין את סך כמות נפח הנגר שזרם כתוצאה מהסופה, שווה עבור כל תוכנית, לפני הצבת המתקן ולאחר מכן, אך במקרה השני ערך ספיקת השיא קטן יותר. על מנת לקבל משטר זרימה ממותן כמו זה המובא באיור יש לספק נפח אגירה אשר יכיל את ההפרש בין נפח המים של הזרימה ללא המתקן וההידרוגרמה הרצויה. נפח זה שווה לשטח הכלוא בין שני הגרפים בין מרכז הצירים לבין נקודת המפגש ביניהם.

חישוב נפחי מתקני השהייה

סכמה של מתקן השהייה ופעולתו בו ניתן לראות באיור 32.



איור 32 - סכמת פעולת מתקן השהייה

Figure 32 - Schematic of the detention facility

ממשוואת מאזן המסה במיכל מתקבל היחס הבא:

$$(5.2) \quad Q_{in}(t) - Q_{out}(t) = A \frac{dh}{dt}$$

ניתן לארגן את המשוואה לצורך פתרון נומרי בצעדי זמן Δt בצורה הבאה:

$$(5.3) \quad h_{i+1} = h_i + \frac{Q_{in}(t) - Q_{out}(t)}{A} * \Delta t$$

הספיקה הנכנסת למתקן, $Q_{in}(t)$, התקבלה מתוך ההידרוגרמות המייצגות את ספיקת מי הנגר במוצא בזמן נתון. הספיקה היוצאת מהמתקן חושבה בצורה הבאה:

ניתן לתאר את התנהגות המים במתקן בנקודת הכניסה, במפלס פני המים, ובספיקה נקודת היציאה על פי משוואת ברנולי, כלומר סכום עומד הרום, עומד הלחץ ועומד המהירות שווים בשתי נקודות אלו:

$$(5.4) \quad Hz_1 + Hv_1 + Hp_1 = Hz_2 + Hv_2 + Hp_2$$

משום ששטח כניסת המים גדול בהרבה משטח חריר יציאת המים הרי שמהירות השתנות גובה מפלס המים זניחה ביחס למהירות יציאת המים מהמתקן, בנקודת כניסת המים בגובה פני המים, ערך עומד הלחץ ועומד המהירות הינם אפס ועומד הרום מבוטא על ידי גובה פני המים במתקן, h .

בנקודת היציאה מהמתקן עומד הלחץ ועומד הרום הינם אפס ואת עומד המהירות מבטאים במשוואה:

$$(5.5) \quad Hv = \frac{v^2}{2g}$$

כאשר משווים את ערכי העומד בין שתי נקודות אלו במשוואת ברנולי ומבודדים את ערך המהירות מתקבל

$$(5.6) \quad h = \frac{v^2}{2g} \Rightarrow v \left[\frac{m}{sec} \right] = \sqrt{2gh}$$

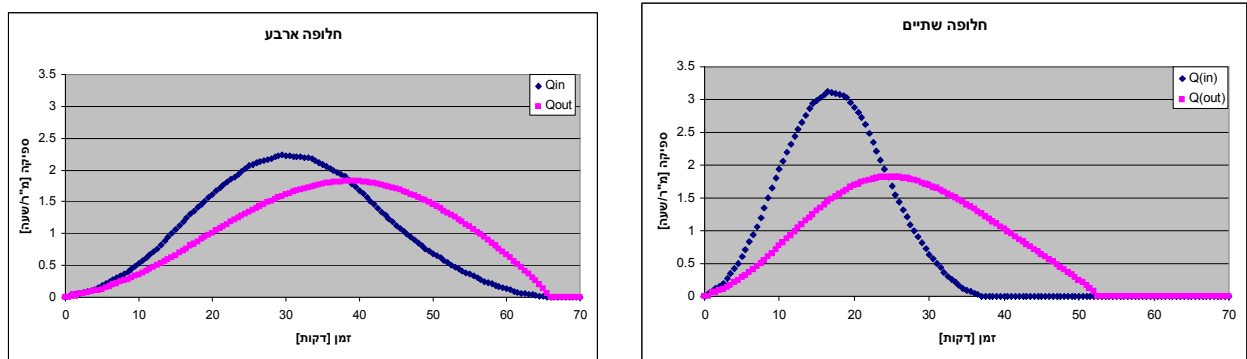
את ספיקת המים ביציאה מפתח היציאה ניתן לבטא כמכפלה בין שטח פתח היציאה, a , למהירות הזרימה

$$(5.7) \quad Q_{out} = a\sqrt{2gh} \quad \text{בו:}$$

נעשה תהליך האופטימיזציה בתוכנת Excel על ידי שימוש בפונקציה Solver אשר מטרתו קביעת נפח המתקן. על ידי שינוי המשתנים - גודל פתח יציאת המים מהמתקן וגודל המתקן עצמו - ושאיפתם לערך מינימאלי, תוך הגבלת גובה המים במתקן בזמן נתון כך שלא יחרוג מגובה המתקן עצמו וקביעת ערך ספיקת השיא המתקבל כתוצאה מהחישוב כשווה לערך ספיקת השיא לפני הפיתוח. נקבע צעד זמן של

30 שניות עבור הידרוגרמת הספיקות הנכנסות. בתחילת אירוע הגשם $t=0$, עוד לא נוצר נגר לכן ערך הספיקה הנכנסת שווה לאפס, מכאן שגובה המים במתקן שווה לאפס ולכן גם הספיקה היוצאת ממנו. בסוף תהליך האופטימיזציה התקבל נפח המתקן וגודל פתח היציאה ממנו.

התהליך בוצע עבור שתי התוכניות והתקבלו שני מתקנים בעלי גדלים שונים. ההידרוגרמות המייצגות את ספיקת המים הנכנסת למתקן והיוצאת ממנו מוצגות באיור 33.



איור 33 - ספיקת כניסה ויציאת מים מהמתקן השהייה.

Figure 33 – Discharge into and out of the detention facility

מתקבל שעבור התוכנית המאושרת יש להציב מתקן השהייה אשר שטח החתך של פתח יציאת המים שלו יהיה 0.3 מ"ר ומימדיו: שטחו כ-7 מ"ר וגובהו כ-3.5 מטר, כך שמתקבל מתקן בנפח 22.2 מ"ק. עבור התוכנית המוצעת מתקבל פתח יציאה בגודל של 0.3 מ"ר ומימדיו: כ-9.4 מ"ר וגובהו כ-3.06 מטר, כך שמתקבל מתקן בנפח 14.36 מ"ק, ערך הקטן כמעט בחצי בהשוואה למתקן המתקבל עבור התוכנית המאושרת.

6 סיכום ומסקנות

6.1 מבוא

עבודה זו מהווה המשך לסדרת מחקרים שנעשו בטכניון בנושא תכנון רגיש למים (תר"מ), גישת תכנון הדוגלת בשילוב שיקולי ניהול מים לכל אורך שלבי התכנון והפיתוח של שטחים בנויים. העבודה עוסקת בניהול נגר עירוני, שהוא מרכיב מרכזי בתוך תכנון רגיש למים, בגבעת זמר - שכונה מתוכננת על הכרמל.

מרבית מחקרי תר"מ התמקדו בהשפעות הפיתוח מעל אקוויפר החוף, עקב הדאגה למאגר מים חשוב זה והנזקים ההידרולוגיים הנגרמים לו על ידי הפיתוח העירוני האינטנסיבי אשר חל במישור החוף, באזור של מורד הנחלים. עבודות אלו התמקדו בעיקרון התר"מ של השאת תועלות משימוש ישיר או עקיף בנגר העל קרקעי, בעיקר באמצעות החדרתו לאקוויפר החוף הפריאטי. בשונה מכך, המחקר הנוכחי עוסק בשכונה בכרמל, במעלה אגנו של נחל, במקום בו התועלת מהחדרת נגר אינה ברורה. בהתאמה לכך, מחקרנו מדגיש עיקרון אחר של תר"מ, העיקרון של תכנון מונע. בעוד שתכנון קונבנציונלי של נגר ממוקד בהגנה משטפונות (ר' שמו של החוק מ-1957, המסדיר את ההתנהלות עד היום, "חוק הניקוז וההגנה מפני שטפונות"), תר"מ מחייב גישה אקטיבית למניעה/הקטנה של שטפונות לפני שהם זורמים למורד הנחל, באמצעות פעולות במעלה. המחקר עוסק בשכונה מתוכננת בכרמל בשם גבעת זמר ובוהן אמצעים מגוונים להאטת והקטנת הזרימה היוצאת ממנה על ידי עיכוב, אצירה, אגירה וגם החדרה של חלק מן הנגר לפני שהוא יוצא לכיוון המורד.

6.2 מטרות המחקר ומימושו בעבודה הנוכחית

המטרה המרכזית של המחקר כפי שנוסחה בתחילת העבודה הינה "לבחון את יישום עקרונות ואמצעי תר"מ לניהול הנגר בשכונת מגורים מתוכננת בחיפה, באזור המאופיין בטופוגרפיה תלולה וקרקע סלעית-גירית".

ממטרה כללית זו נגזרו מטרות משנה ופותחו גישות למימושו, כלהלן:

(א) בחירת כלי חישוב, אשר יביאו לידי ביטוי בצורה הטובה ביותר את השפעות הפיתוח של כל תוכנית וייצרו למתכנן תוצאות, המאפשרות לקבל החלטות על בסיס תוצאות הידרולוגיות מחושבות של חלופות תכנון שונות.

ההשפעות ההידרולוגיות של תכניות אלטרנטיביות חושבו על ידי שימוש במודלים, תוך התמקדות במשתנים ספיקת שיא ונפח נגר סופתי ושנתי. ספיקת השיא, האמורה לשמש לתכנון מערכת הנקזים, חושבה באמצעות השיטה הרציונלית. נפחי הנגר הסופתי לסופות בעלות עובי גשם שונה, וכן לאוכלוסיית הסופות במשך שלוש שנים, חושבו באמצעות מודל SCS מבוזר, המהווה הרחבה של המודל המקובל בשיטת SCS. מודל SCS מבוזר - בניגוד למודל SCS האגרטיבי המתואר ב-TR-55 - מביא לידי ביטוי את פיזור ומיקום שימושי הקרקע השונים בשטח האגן ולא את שטחם הכולל בלבד. יש לציין כי פרסומים מוסמכים העוסקים במודל SCS ויישומו, כולל מן העת האחרונה דוגמת Hawkins et al. (2009), עדיין מתייחסים ל-CN ממוצע ואין בהם התייחסות ל-DSCS. המודל המבוזר המוצע בעבודה זו מאפשר לבחון את ההשפעות ההידרולוגיות של שינוי מיקומם של שימושי קרקע.

(ב) ללמוד ולהבין בעזרת הספרות המקצועית, מהם השינויים ההידרולוגיים והסביבתיים הצפויים, עקב בנייה של שכונה חדשה בכרמל, על פי תוכנית קונבנציונלית של בנייה וניקוז.

מימוש מטרה (ב) מתבטא בסקירת הספרות הרלבנטית בפרק 2 ובלימוד תנאי האתר בפרק 3 של חיבור זה.

(ג) להציע תכנית חלופית למערך שימושי הקרקע ולניהול הנגר בשכונה, על פי גישת תר"מ, ולחשב את השפעותיה על התוצאות ההידרולוגיות (נפחים וספיקות), בהשוואה לחלופת בסיס שתוכננה בדרך קונבנציונלית.

העבודה החישובית שנדרשה עבור מימוש מטרה (ג) בוצעה עבור שתי חלופות תכנון עיקריות, עם וריאציה לגבי כל אחת מהן, שיצרה ארבע חלופות, כלהלן: (1) תוכנית הפיתוח המקורית, אשר התקבלה מעיריית חיפה (אמנם, תוכנית הפיתוח המקורית עברה שינויים בתקופת המחקר הנוכחי, אך כאן נתייחס לגרסה המקורית שלה); (א1) תוכנית הפיתוח המקורית, בתוספת המתקנים הבאים לניהול הנגר: גגות ירוקים, משטחים חדירים, תעלות עשב, מתקני אגירה והשהייה תת קרקעים; (2) חלופה מוצעת, אשר בה שונה מיקומם של שימושי הקרקע, במיוחד מיקום הכבישים והשטחים הפתוחים החדירים לנגר, כך שיקטינו את הספיקות, כולל את ספיקת השיא המשמשת לתכנון הניקוז, ואת נפחי הנגר במוצא מן השטח המתוכנן; (א2) החלופה המוצעת, בתוספת המתקנים לניהול הנגר שנכללו בחלופה (א1).

סיכום הממצאים החישוביים שפורטו בפרק 5 יינתן בסעיף 6.3 שלהלן.

(ד) לדון בתועלות המגוונות המופקות מתכניות שעוצבו על פי עקרונות תר"מ.

הדיון יפורט בסעיף 6.4 שלהלן.

6.3 סיכום הממצאים החישוביים

הממצאים החישוביים מלמדים על עדיפות עקבית של החלופות התכנוניות שעוצבו על-פי עקרונות תר"מ על פני התכנית המקורית שהתקבלה מן העירייה. מסקנה זו תופסת הן לגבי ספיקות שיא והן לגבי נפחי הנגר, כפי שחושבו במוצא מן השכונה.

6.3.1 ספיקות שיא במוצא השכונה

להלן ממצאים עיקריים:

- ערך ספיקת השיא היוצאת מן השכונה בחלופה המוצעת, המתוכננת על-פי עקרונות תר"מ לניהול נגר (מס' 2), קטן ב-30% מזה של התוכנית התכנית המקורית (חלופה 1) (ר' טבלה 16).
- ספיקת השיא היוצאת משטח השכונה על-פי התכנית המקורית (מס' 1) גדלה ב-50%, בהשוואה למצב הטבעי שלפני פיתוח השכונה, בעוד שבחלופה המוצעת (מס' 2), הגידול הוא ב-4% בלבד. המימצא מוסבר בכך שבתכנית המוצעת (מס' 2) זמן ריכוז הנגר ארוך יחסית, כתוצאה מהארכת נתיב זרימת המים ומיתון שיפועו.
- כאשר היעד הוא להשוות את ערכי ספיקת השיא של הנגר היוצא מן השכונה לאחר פיתוחה לערכים שאפיינו את השטח במצבו הטבעי שלפני הפיתוח, בחלופה המקורית (מס' 1) דרושים מתקני אגירה והשהייה גדולים מאילו הנדרשים בתוכנית המוצעת על-פי עקרונות תר"מ (מס' 2): בראשונה דרוש מתקן אגירה בנפח של 57.1 מטר מעוקב, כפול מן הנפח הנדרש עבור השנייה - 28.2 מטר מעוקב; בראשונה דרוש מתקן השהייה בנפח של 22.2 מטר מעוקב, הגדול בכ-65 אחוז מזה הנדרש עבור המוצעת החלופה השנייה - 14.36 מטר מעוקב (ר' איורים 33 ו-325.10).

6.3.2 נפחי נגר במוצא השכונה

- השפעת החלופות על נפח הנגר הסופתי, מסופות בעלות עובי שונה, מתוארת באיורים 26 ו-27. המימצאים העיקריים הם:
- נפחי הנגר הסופתי בחלופה 2, אשר תוכננה על-פי עקרונות תר"מ, קטנים מאלו של חלופה 1, החלופה המקורית לתכנון השכונה, בשיעור של כ-40%, עבור כל ערכי עובי הגשם.

- הוספת מתקני תר"מ לחלופה 1, ליצירת חלופה 1א, מקטינה את נפחי הנגר הסופתי בשיעור משתנה בין כ-60% בעובי גשם נמוך וכ-25% בעובי גשם גבוה.
 - הוספת המתקנים לחלופה 2, ליצירת חלופה 2א, מקטינה את נפחי הנגר הסופתי בשיעור אפסי בעובי גשם נמוך ולערך של כ-50% בעובי גשם גבוה.
 - הצירוף של שינוי שימושי הקרקע ותוספת מתקנים, כלומר מעבר מחלופה 1 לחלופה 2א, מקטינים את נפח הנגר הסופתי בשיעור אפסי בעובי גשם נמוך ועד כ-60% בעובי גשם גבוה.
 - מתחת לעובי גשם של כ-50 מ"מ חלופה 1א מייצרת קצת פחות נפח נגר מחלופה 2 (איור 27), ואילו מעבר ל-50 מ"מ הסדר מתהפך. הדבר מוסבר בכך, שבחלופה 1א הפחתת הנגר מבוצעת על ידי מתקנים, ואלו מסוגלים לטפל בכמויות גשם קטנות יחסית. מאידך, הקטנת הנגר בחלופה 2 מתקבלת באמצעות שינוי מיקומם של שימושי הקרקע כך שנגר המתקבל מתכסיות אטומות יחסית מובל אל תכסיות חדירות יותר וחודר שם, ואפקט זה ניכר יותר בעוצמות גשם גבוהות.
- בכדי לבחון את השפעת החלופות התכנוניות על סה"כ כמות הנגר השנתית נעשה שימוש בנתוני סופות של שלוש שנים - 2001/2 עד 2003/4. אלו נלקחו מנתוני עובי גשם יומי אשר נמדדו בתחנת הגשם קריית הטכניון, הנמצאת במרחק לא רב מן השכונה הנבחרת, גבעת זמר. נתוני הגשם היממתי הוכנסו לתוך מודל SCS המבוזר עבור ארבע החלופות (ר' תוצאות מרוכזות בטבלה 15). הממצאים העיקריים הם:
- (1) חלופה 1 מייצרת את נפח הנגר המצטבר הגדול ביותר וחלופה 2א מייצרת את נפח הנגר המצטבר הקטן ביותר. היחס בין הנגר השנתי המתקבל עבור חלופה 2א ביחס לחלופה 1 נע בין כ-21.5 אחוז ל-18 אחוז. הדבר תואם את התוצאות באיורים 26 ו-27, בהם עבור כל עובי גשם חלופה 1 מייצרת יותר נפח נגר מחלופה 2א. יחס הנגר השנתי בין חלופה 2 לחלופה 1א עבור שנים אלו נע בין 89 אחוז ל-83 אחוז, יחס זה הינו תוצר של עובי הגשם היומי בסופות הנמדדות אשר היה נמוך ברובו המכריע מערך הסף בו חלופה 2 מייצרת יותר נפח נגר.
 - (2) נפח הנגר הגדול ביותר התקבל בשנת 2003/4, עבור כל החלופות, למרות שבשנים 2001/2 נמדד עובי גשם שנתי גדול בכ-9% ביחס לממוצע הרב-שנתי. תוצאה זו מוסברת בשוני בעובי הסופות בשנים אלו: בשנת 2001/2 נמדדו 4 סופות בעובי גשם הגדול מ-20 מ"מ, ואילו בשנים 2003/4 נמדדו 7 סופות בעובי גדול מ-20 מ"מ (ר' איור 28).

6.4 דיון בתועלות המופקות מתכנון השכונה הנבחרת על-פי עקרונות תר"מ לניהול

נגר

1. הוזלת מערכת הניקוז בשטח השכונה – הקטנת ספיקות שיא מאפשרת בנייה של מערכת ניקוז בעלת קטרים קטנים יותר, דבר המוריד את עלותה. החלופה המוצעת (חלופה 2) הניבה ערכי ספיקות שיא נמוכים יותר מהתוכנית המקורית (חלופה 1). כאשר חלופות אלו שולבו עם מתקני ניהול נגר, חלופות 1א ו-2א הניבו ערכי ספיקות שיא אשר לא היו גבוהים מערכי ספיקות השיא טרם הפיתוח. באם מתכנני ניקוז יבחרו להתחשב בערכים אלו, תתכן בנייתה של מערכת ניקוז בעלת קטרים ועלויות קטנים יותר. הוספת המתקנים בשכונה עצמה (גגות ירוקים, תעלות עשב) אינה משפיעה בחישובים על ספיקת השיא. ההסבר הוא, שבשיטה הרציונלית מה שקובע את ספיקת השיא הוא זמן הריכוז, ואין בשיטה הרציונלית מתכון ברור להכללת השפעת אלמנטים מסוג זה על זמן הריכוז. ניתן היה אולי להניח ערך שונה למקדם C (טבלה 16) עבור חלופות 1א ו-2א, אלא שאין הנחייה מובהקת בשיטה הרציונלית כיצד לעשות זאת. השפעת חלופות 1א ו-2א על הקטנת הספיקות במוצא מן השכונה מושגת באמצעות מתקני השהייה ואגירה במוצא מן השכונה.
2. הפחתת העומס ממערכות הניקוז באגן ובמורדו – על ידי הקטנת ספיקות השיא, נפחי המים, וחומרי הסחף בנגר, יורד העומס ממערכות הניקוז וממובילי המים השונים בשכונה ובמורדה ובכך קצב התבלותם קטן.
3. הפחתת סחף ובלייה בערוצים הטבעיים – על ידי הקטנת ספיקות השיא הנוצרות במוצא מן השכונה ומתנקזות מזרחה ומערבה אל הגאיות, קטנים כוחות הגזירה הזורמים בהן, ולכן קטנים כמות הסחף וקצב הבלייה של הערוצים.
4. שיפור תפקודו האקולוגי של הנוף השכונתי - תכנון המנצל את הנגר כמקור מים להשקיית צמחיה בכלל, וכזו בעלת בית שורשים עמוק בפרט, תורם לקיומם וליכולת התחדשותם של מערכות ומשאבי טבע בשכונה. בחלופות התכנון 2 ו-2א, אשר בהן מיקום שימושי הקרקע מאפשר הובלת נגר הנוצר בשטחים אטומים אל שטחים חדירים, שצ"פים ואזורים טבעיים, הצמחייה בשטחים אלו תהנה מעודפי המים אשר ינותבו אל אזורים אלו ויחלחלו בהם.
5. הוספת איכויות חזותיות לנוף השכונתי - שימוש במתקני ניהול נגר והמים הזורמים בהם מהווים פוטנציאל של תרומה לנוף. שילוב "גגות ירוקים" באזור משופע, בנוסף ליתרונותיו ההידרולוגיים, תורם לשיפור הנוף החזותי הנשקף מהמעלה, בכך שיחליף את הגגות הקונבציונאליים בעלי החזות ה"אפורה" בצמחייה חיה.
6. שימור והעשרת מקורות המים – ככל שהצלחנו לברר, נגר החודר לקרקע בשטח של גבעת זמר מגיע לאקוויפר הכרמל המזרחי, אשר איכות המים בו מאפשרת שאיבה וניצול של המים. חלופות התכנון

אשר הוצעו הניבו ערכי נפח נגר קטנים במוצא השכונה, ביחס לתוכנית הפיתוח המקורית, וסביר להניח כי חלק ממי הגשם יחדרו למי התהום ויתרמו להעשרתו של אקוויפר הכרמל.

6.5 מסקנות כלליות לגבי ניהול נגר עירוני

מן המחקר עלו מספר מסקנות לגבי ניהול נגר בגישת תר"מ:

(א) תכנון שכונה, המבוסס על סידור מרחבי של שימושי קרקע, אשר בו השטחים החדירים ממוקמים במורד מן השטחים האטומים, יוצר פחות נפח נגר מאשר תכנון המבוסס על הגדלת כושר החידור של תכניות הקרקע במעלה. מסקנה זו נכונה עבור עוביי הגשמים האופייניים לאזור הנבדק ולערכי מקדמי ה-CN אשר נבחרו עבור שימושי הקרקע השונים. יש לחזור ולבחון מסקנה זו עבור אזורים המאופיינים בעוביי גשם גדולים יותר ושימושי קרקע אטומים יותר (המיוצגים במקדמי CN גדולים יותר).

(ב) מתקני השהייה ואגירה בגודל סביר במוצא השכונה יכולים להקטין את ספיקות השיא היוצאות מן השכונה למורד עד לערך שהיה לפני הפיתוח.

(ג) נראה כי פיתוח בעל אופי תר"מי הינו בר יישום עבור התנאים בשכונה בעלת האופי של גבעת זמר. עם זאת, הזזת שימושי הקרקע, הארכת הכביש והכנסת אמצעים כמו גגות ירוקים, תעלות עשב, מסעות חדירות, ומתקני השהייה ואגירה – כל אלה טעונים בדיקה עם מתכנני השכונה והנוף על מנת לוודא שהם אפשריים ואינם יוצרים עלות סביבתית וחברתית בלתי קבילה.

(ד) ניתן להניח, כי פיתוח תר"מי בגבעת זמר לא יוביל לעלויות גבוהות יותר מפיתוח רגיל, בהתבסס על דוח ה-EPA (2007), בו השוותה עלות הפיתוח עבור 17 אזורי פיתוח שונים בערים בארה"ב בין פיתוח קונבנציונלי ופיתוח המתחשב בשיקולים הידרולוגיים בהתאם לגישת LID הדומה בעקרונותיה לגישת תר"מ. שם נמצא כי עלות הפיתוח הכוללת בגישת LID לא רק שאינה גדלה ביחס לתכנון קונבנציונלי אלא קטנה בערך הנע בין 15 ל-80 אחוז.

כמו כן, מן המחקר עלו מספר מסקנות לגבי שיטות החישוב והנתונים הדרושים:

1. מודל SCS אינו מפורט דיו לצורך אמידת השפעת הפיזור המרחבי של שימושי הקרקע השונים. לכן יושם מודל SCS מבזור, אשר תואר בהרחבה בפרק 4. השימוש במודל SCS מבזור, למרות היותו מורכב יותר ודורש משאבים רבים יותר, מהווה יתרון במהלך השוואת החלופות וכתוצאה מכך בקבלת החלטות עבור האזור הנבדק. השוואת תוצאות המודל המבזור למודל המקורי עבור מתארי פיתוח שונים כפי שהודגם בפרק 5 הוביל למסקנה כי שימוש במודל המבזור צפוי להוביל לתועלת למתכננים גם באזורים אחרים.

2. מאידך, כלי החישוב לבחינת השפעתם של מתקני השהייה ואגירה במוצא השכונה פשוטים וזמינים.

3. יש חסר בנתונים מכל הסוגים, כולל:

- נתונים רצופים של סופות גשם או לפחות כמויות גשם לפרקי זמן של יממה בתחנות צפופות דין כך שניתן יהיה להניח כי הנתונים תקפים לאתר התכנון;
- ניתוח נתוני גשם ויצירת עקומי עצמה-משך-תקופות חזרה הדרושים לחישוב ספיקות תכן באתרי התכנון ברחבי הארץ;
- נתוני חדירות ו/או מקדמי CN של קרקעות, שימושי קרקע, ותכסיות.

6.6 המלצות לאיסוף נתונים ומחקר בעבור שיפור החישובים הדרושים לניהול נגר

עירוני על-פי עקרונות תכנון רגיש למים

סקר הספרות, איסוף הנתונים למחקר זה וביצוע החישובים העלו חסרים ופערים במידע ובידע, שהינם בעלי השפעה על היכולת לקבל תוצאות משכנעות ואמינות על חלופות התכנון בגישת תר"מ. אי לכך, מומלצים כיווני העבודה והמחקר הבאים:

- פעולה לריכוז מערכים של נתוני גשם מפורטים לסופות או לפחות ליממות ולניתוחם לצרכי הפעלת מודלים חישוביים. האחריות מוטלת על מוסדות המדינה (שרות מטאורולוגי, שרות הידרולוגי), אך בהעדר נתונים מספיקים מוטלת האחריות גם על רשויות אזוריות ומקומיות המעוניינות להבטיח שהתכנון שבשטחן יתבסס על נתונים אמינים ומדויקים.
- התאמת מודל SCS לתנאי הארץ. לשם כך יש לכייל את מקדמי CN באמצעות פרויקטי ניטור ומדידה באזורים שונים בארץ ובתנאי קרקע, צמחיה, תכסית ושיפוע שונים. מודל SCS מקובל בארצות המערב (ארה"ב, קנדה) לחישוב נפחי נגר סופתיים ושנתיים והוא פשוט וקל ליישום – בתנאי שיש ערכים אמינים למקדמי CN. שיטת SCS גם מאפשרת לייצר מנגר הנגר הסופתי הידרוגרמה הנותנת גם ערך של ספיקת השיא.
- בחינת השימוש במודל SCS מבוזר, המביא לידי ביטוי את הפריסה המרחבית של שימושי ותכסיות הקרקע, כפי שנעשה בעבודה זו. נדרשת גם בחינת ההבדלים בין התוצאות המושגות

באמצעות מודל SCS הרגיל והמודל המבוזר, משום האחרון דורש נתונים מפורטים יותר וחשובים מורכבים, שאינם מצויים תמיד ו/או דורשים השקעה משמעותית להשגתם.

- יצירת פונקציות ו/או מודלי חישוב של השפעת אמצעי תר"מ שונים – הן מבוזרים ברחבי האגן (גגות ירוקים, מסעות חדירות, תעלות דשא, בורות החדרה, הקפת מגרשים בקירות נמוכים) והן מרוכזים בנקודות בתוך האגן או במוצאו (ביו-פילטרים, מאגרי השהייה ואגירה) – על נפחי הנגר ועל ספיקותיו. חלק ניכר מן העבודה יכול להתבסס על ממצאים של מחקרים ופעולות ניטור באוניברסיטאות ובמוסדות תכנון בארצות אחרות (יפן, ארה"ב, אוסטרליה, קנדה, גרמניה, ועוד).
- ניטור איכות מי הנגר בשכונות מגורים ובמוצאן, ועדויות מהימנות על השפעת תכנון תר"מ של תכסיות הקרקע ומתקנים על איכות מי הנגר.
- פרויקטי חלוצי: לניסוי אמצעים תר"מיים ובחינת השפעתם על נפחי, ספיקות ואיכות מי הנגר, מלווים בניטור רב-שנים ובמחקרים, שיתנו בסיס מוצק יותר לתכנון בגישת תר"מ המתאים לאזורים השונים בארץ.

7 מקורות

אברי לבנה, ראיון אישי.

אלון רימר, ראיון אישי.

אלכס פורמן, ראיון אישי.

אסף, ל., נתיב, ר., חסן, מ., ושיין, ד. (2002) כמויות ואיכויות נגר עירוני בעיר אשדוד, דו"ח מחקר. ירושלים: האוניברסיטה העברית.

בורמיל, ש., שמיר, א. וכרמון, נ. (2003) נגר עירוני בשכונות מגורים, דו"ח משולב למשרד הבינוי והשיכון ולמשרד לאיכות הסביבה, המרכז לחקר העיר והאזור, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל.

גבירצמן, ח. (2002) משאבי המים בישראל: פרקים בהידרולוגיה ומדעי הסביבה. ירושלים: יד יצחק בן-צבי.

גוטמן, י. (1998) אפיין מערכות הזרימה ויחסי הגומלין בין גופי מים באזור חוף הכרמל. חיבור לקבלת תואר "דוקטור לפילוסופיה". אוניברסיטת תל אביב.

גרינבאום, נ., ארבל, י. לנג, י. וויטנברג, ל. (2007) הערכת השינויים העתיים והמרחביים במנגנוני החידור למי תהום בכרמל. מחקרים בתחום המים, רשות המים, מדינת ישראל, ע"מ 4-12.

דן, י., רז, צ. (1970) מפת חבורת הקרקעות של ישראל, בקנה מידה 1:250,000, בית דגן, המחלקה לפרסומים מדעיים, תש"ל.

השרות ההידרולוגי (2007) התפתחות ניצול ומצב מקורות המים בישראל עד סתיו 2006, מדינת ישראל, משרד התשתיות הלאומיות – נציבות המים, השרות ההידרולוגי.

חדד, ח. (2007) נגר כמשאב בפיתוח הנוף העירוני. עבודה לתואר שני בהנחיית טלי אלון-מוזס ונעמי כרמון. חיפה: הטכניון, הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים.

כץ, ש., בורמיל, ש., כרמון, נ. ושמיר, א. (2001) תכנון עירוני רגיש למים – החדרת גשם למי תהום באמצעות עיצוב חצרות, המרכז לחקר העיר והאזור, הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל.

כרמון, נ. ושמיר, א. (1997) תכנון עירוני רגיש למים: הגנה על אקוויפר החוף הישראלי, חיפה: המרכז לחקר עיר ואזור, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל.

לוי, א. (2001), חלופות שונות להגברת החלחול בשטחים עירוניים ציבוריים: פרויקט תזה, חיפה: הטכניון, הפקולטה להנדסה אזרחית.

מרדכי מובשוביץ, ראיון אישי.

מובשוביץ, מ. (2001) סקר הידרולוגי לבדיקת פוטנציאל לניצול האקוויפרים בשטחי עיריית חיפה, עיריית חיפה, מינהל ההנדסה, אגף המים הביוב והניקוז.

מירון-פיסטינר, ס., כרמון, נ. ושמיר, א. (1996) בנייה עירונית ומי תהום: לקראת הנחיות למתכננים, חיפה: המרכז לחקר עיר ואזור, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל.

משרד הבינוי והשיכון, המשרד לאיכות הסביבה ומשרד החקלאות ופיתוח הכפר (2005), מדריך לתכנון ובנייה משמרת נגר עילי. ראש העין: אנוש (מערכות איכות סביבה ותכנון אורבני), אביב.

גבעת זמר (לשעבר גבעת עופר), (2009) שינוי יעודי קרקע והוראות בנייה, נספח נופי לתוכנית חפ/1571 א' חיפה,

ענבר מ, אמציה פ, זיגל, א. (2005) דו"ח סופי למחקר: מציאת מקדם הנגר העילי בסביבה עירונית, החוג לגיאוגרפיה ולימודי סביבה, אוניברסיטת חיפה.

קרונבטר, ל., כרמון, נ. ושמיר, א. (1998), תגובה הידרולוגית של אגנים עירוניים: פרויקט תזה, חיפה: הטכניון, הפקולטה להנדסה אזרחית.

רגב, ד. (1993) ניצול נגר על-קרקעי באמצעות מערכות ביוב, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל.

שמיר, א., כרמון, נ. (2007), תר"מ – תכנון רגיש למים: שילוב שיקולי מים בתכנון עירוני ואזורי, חיפה: הטכניון, מכון גרנד למחקר המים והמרכז לחקר העיר והאזור.

Argue, J., (Ed.) (2005) Water Sensitive Urban Design: Basic Procedures for 'Source Control' of Stormwater: A Handbook of Australian Practice, Australian Water Association, The Stormwater Industry Association, and the University of Southern Australia, with Executive Summary at http://www.waterbalance.ca/waterbalance/dynamicImages/369_WSUDHandbookExecutiveSummaryMar2005.pdf

Armon, R. (1997), Recharge of Groundwater by Infiltrated Urban Runoff: Quality Aspects (Microbiological and Chemical), In Water Sensitive Urban Planning: Protecting Israelis Costal Aquifer, ed. Carmon Naomi and Shamir Uri, Haifa: Center for Urban and Regional Studies

Arnold J.G., Williams J.R. (1995). SWRRB - a watershed scale model for soil and water resources management in computer models of watershed hydrology. (V.P. Singh, Editor)' 847-908/ water resources publications, highlands ranch, CO.

Bean, E. Z., Hunt, W. F., and Bidelspach, D. A. (2007b). Evaluation of four permeable pavement sites in eastern North Carolina for runoff reduction and water quality impacts. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133(6): 583-592.

Bennet, P. C., Hiebert, F. K., Wan J, C. (1996) Microbial colonization and weathering of silicates in a petroleum-contaminated groundwater. Department of Geological Sciences, University of Texas, Austin. TX 78712. *Chemical Geology* 132 45-53

Berg G., Ed (1967) Transmission of virus by water rout. Wiley, New York.

Bledsoe, B.P. (2002) Stream Erosion Potential and Stormwater Management Strategies M.ASCE1 10.1061/(ASCE)0733-9496,128:6(451)

Braden, J.B. and Johnston, D.M. (2004) Downstream Economic Benefits from Storm-Water Management", *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, November/December 2004, pp. 498-505.

Burrough P.A., McDonnell R.A. (1998) Principles of Geographic Information Systems, Oxford University Press.

Cannon, J. D. (2009) Protecting Water Quality in Urban Areas: Local Planning Approaches for Implementing Stormwater Best Management Practices at the Site Level. The Hubert H. Humphrey Institute of Public Affairs , University of Minnesota.

Carmon, N., Shamir, U. (2009) Water-sensitive planning: integrating water considerations into urban and regional planning, Technion, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

CIRIA – Construction Industry Research and Information Association (2004) *Sustainable Drainage News – Issue 6, July 2004*. www.ciria.org/suds

Chicago metropolitan agency for planning website: <http://www.goto2040.org/ideazone/forum.aspx?id=850> , last entered 2.11.09.

Coffman L. (2000) Low Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach. EPA 841-B-00-003. Maryland: Prince George County.

Clar, M., (Editor in Chief) (2007) Low Impact Development New and Continuing Application, Wilmington, North Carolina.

Cunningham, A.B., Characklls, W.G., Abedeen, F. and Crawford D. (1991) Environ. Influence of Biofilm Accumulation on Porous Media Hydrodynamics. Center for Interfacial Microbial Process Engineering, Montana State University, Bozeman, Montana 597 17 . Sci. Technol. IQS1, 25, 1305-1311.

Dahan, O., Rimon, Y., and Nativ, R. (2005) Real-Time Monitoring of Infiltration Processes and Groundwater Recharge in an Unconfined Aquifer, Salt Lake City Annual Meeting (October 16–19, 2005)

Department of Defense, USA .Unified Facilities Criteria. (2004) Design: Low Impact Development Manual.

Environmental Protection Agency. (1977) National Nonpoint Source Water Pollution Control Strategy (draft). Nonpoint Source Strategy Task Force, U.S. EPA, Washington, D.C.

Freshwater Foundation. (1988) Nitrate: Rerun of an Old Horror. Health and Environment Digest 1(12):n.pag.

Garg V, Chaubey I, Haggard BE. (2003) Impact of calibration watershed on runoff model accuracy. Transactions of the ASAE 46(5): 1347–1353.

Getter, K, L. Rowe, D., Bradley. A., Jeffrey A. (2007) Quantifying the Effect of slope on extensive green roof stormwater retention. Ecological Engineering 31.

Gilbert, J.K., Clausen, J.C. (2006). Stormwater runoff quality and quantity from asphalt, paver, and crushed stone driveways in Connecticut. Water Res. 40(4):826-832.

Hawkins, R.H., Ward, T.J., Woodward, D.E. and Van Mullen, J.A. (2009) Curve Number Hydrology State of Practice, American Society of Civil Engineers, Environmental and Water Resources Institute, ISBN 978-7844-1004-2.

Kronaveter, L., Shamir, U. and Kessler, A. (2001) Water-Sensitive Urban Planning: Modeling On-Site Infiltration, Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, March/April 2001, pp. 78-88.

Leopold B. L. (1968) Hydrology for- Urban Land Planning -A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use, Geological Survey Circular R 5 5 4. United States Department of the Interior.

Linsley R.K., Kohler M.K., Paulhus J.L.H., (1949) Applied Hydrology. McGraw Hill, New York.

Maidment, D.R., (Editor in Chief) (1993), Handbook of Hydrology, McGraw-Hill, 1400pp.

Maryland environmental design program website:
<http://www.dnr.state.md.us/ed/index.html>, last entered 2.11.09.

Minnesota Pollution Control Agency. Protecting Water Quality in Urban Areas - A Manual. <http://www.pca.state.mn.us/water/pubs/sw-bmpmanual.html>. last entered 01-09-09.

Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A. Mihalakakou, G. (2001) Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. Energy and Buildings, 33(7), pp. 719–729.

Pitt, R., Clark, S., Parmer, K. and Filed, R. (1996) Groundwater Contamination from Stormwater Infiltration, Ann Arbor Press, Inc.

Coffman, L(1999) Low-Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach, , Prince George's County, Maryland, Department of Environmental Resource, Programs and Planning Division, 9400 Peppercorn Place, Largo, Maryland 20774

Ritzema HP (1994) Drainage Principles and Applications. ILRI: The Netherlands

Schueler, Thomas R. (1994) The Importance of Imperviousness. Watershed Protection Techniques. 1(3):100-111

Sheaffer, J.R., Wright, K.R., Taggart, W.C. & Wright, R.M. (1982) Urban Storm rainage Management, New York, Marcel Dekker.

Texas Guide to Rainwater Harvesting website:
<http://www.twdb.state.tx.us/home/index.asp>, last entered 2.11.09.

Virginia department of conservation website:
http://www.lowimpactdevelopment.org/qapp/treeboxfilter_specs.htm, last entered
 2.11.09.

United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service,
 (1986) TR-55, Technical Release 55. Conservation Engineering Division, Urban
 Hydrology for Small Watersheds.

United States Environmental Protection Agency, Nonpoint Source Control Branch
 (2007) Reducing Stormwater Costs through Low Impact Development (LID)
 Strategies and Practices, Washington, DC.

U.S. Environmental Protection Agency website:
http://cfpub.epa.gov/npdes/stormwater/menuofbmps/index.cfm?action=factsheet_results&view=specific&bmp=67, last entered 3.11.09.

Yaara R., Dahan O. Ronit .N, Stefen G. (2007) Water percolation through the deep
 vadose zone and groundwater recharge: Preliminary results based on a new vadose
 zone monitoring system, Water Resources Research, Vol. 43, W05402,
 doi:10.1029/2006WR004855

Walesh, S. G. (1989) Urban surface water management. John Wiley & Sons, New
 York, 53 pp.

Walsh, CJ. (2000) Urban impacts on the ecology of receiving waters: a framework for
 assessment, conservation and restoration, Hydrobiologia. Vol. 431, no. 2-3, pp. 107-
 114.

Weinstein N. (2009) Decentralized stormwater controls for urban retrofit and
 combined sewer overflow education: phase II, The Low Impact Development Center,
 Inc. University of Maryland Environmental Finance Center

Wittenberg L.,Kutiel H., Greenbaum N., Inbar M (2006) Short-term changes in the magnitude,
 frequency and temporal distribution of floods in the Eastern Mediterranean region during the last
 45 years — Nahal Oren, Mt. Carmel, Israel last 45 years — Nahal Oren, Mt. Carmel, Israel.
 University of Haifa, Haifa 31905, Israel

**Stormwater management in an urban neighborhood
following**

**Water Sensitive Planning principles: Comparison
of alternatives in Givat Zemer on Mount Carmel**

Research Thesis

**Submitted In Partial Fulfillment of The
Requirements for the Degree
Master of Science in Environmental Science**

Shai Shalev

**Submitted to the Senate of
the Technion - Israel Institute of Technology**

Heshvan, 5770

Haifa

April 2011

The research thesis was done under the supervision of Professor Uri Shamir and Professor Naomi Carmon in the faculty of Civil and Engineering.

The generous financial support of the Technion is gratefully acknowledged.

Abstract

Development and construction in previously undeveloped spaces and their conversion into urban areas increase runoff, diminish the quantity of water that percolates into the ground and limit the replenishment of aquifers, lower the quality of the runoff water, and increase the investments required to construct and manage drainage systems.

Urban development results in augmenting the runoff volume and peak discharge, elevating the probability of land erosion and inundations, causing damage to property and sometimes even costing human lives. The development of natural areas changes the flow regime in streams which can damage ecological niches that are fed by runoff from upper parts of the drainage basin.

The objective of managing runoff and drainage according to the principles of Water Sensitive Planning (WSP, whose parallel acronym in Hebrew is TARAM) is to reduce the negative effects of conventional development and increase the benefits that can accrue through better management and use of the runoff.

The present work continues a series of scientific investigations carried out at the Technion on the subject of runoff management and drainage, as a central component of Water Sensitive Planning. These previous investigations addressed the protection of Israel's Coastal Aquifer, which is located close to the outlets of Western flowing streams, and emphasized the benefit that can be achieved by the use of enhanced infiltration. The current investigation deals with a neighborhood located at the top of a mountainous basin – Givat Zemer on the Carmel in Haifa - in which the benefit of infiltrating runoff into the ground is unclear, and where increased runoff leaving the planned neighborhood entails potential damage in the lower parts of the basin. Thus management of the runoff and the drainage system in this neighborhood should be designed to diminish the negative effects and increase the benefits - by use of BPPs (Best Planning Practices – spatial organization of the land uses) and BMPs (Best Management Practices – land cover and structural devices) to decrease the volume and flow rate within the neighborhood and at its drainage outlet.

The objective of this investigation has been stated as "Testing the application of the principles and means of Water Sensitive Planning for management of the runoff in a

planned neighborhood in Haifa, in an area characterized by a steep topography and chalk-based rocky ground layers".

To accomplish this objective, the effect of urban development in Givat Zemer was examined, considering a number of alternative plans: the one proposed by the original developer of the neighborhood and a few proposed by us, which vary the land use and land cover, plus use of BMPs, such as green roofs, grass channels, permeable pavements, structures for detention and retention of runoff.

The hydrological effects of development according to each alternative were calculated by means of models that estimate the storm runoff's volume and its flow rates at the neighborhood's exit. The peak discharge that is to be used to plan the drainage system was calculated by means of the Rational Formula. The storm runoff volume was calculated using a Distributed SCS model for storms with different rain thicknesses as well as for a population of storms measured over a period of three years. The Distributed SCS model, which was developed in the present investigation, is an extension and improvement of the regular and accepted SCS model; it takes into consideration the location of the different land uses in the basin and their relative position in the runoff flow pattern.

The calculation of the maximum flow rate and storm volume were carried out for four development alternatives: 1 - the development plan originally approved by the Haifa Municipality; 1A - the same plan with the addition of runoff management structures (BMPs) at the basin's outlet; 2 - our proposed alternative, based on a different spatial location for land uses, where those with high runoff producing potential were placed at the top of the basin and the more permeable ones further downstream, so that runoff would be routed to the more permeable areas further downstream in the basin; 2A - same as 2 with the addition of runoff management structures (BMPs) at the basin's outlet.

The results of the calculations for the four planning alternatives were analyzed and contrasted. The conclusions of the investigation of runoff management of the neighborhood using the Water Sensitive Planning approach are:

- Planning based on concentrating the permeable areas at the bottom of the developed area produces less runoff volume than the one based on increasing the

infiltration capability of the (existing as originally planned) different land uses. This layout results in a total annual runoff volume reduced to between 20% and 50% as compared to the volume generated by alternative 1, while alternative 1A results in a volume of 60% compared to alternative 1.

- It can be concluded that development with a WSP approach is feasible in the Givat Zemer neighborhood. Still, the means proposed in the new alternative plans, including shifting land uses, re-routing the internal streets and introducing means such as green roofs, grass channels, permeable pavements, structures for detention and retention of runoff, require careful examination with the planners and landscape architects of the neighborhood, to ensure that they are feasible and do not incur unacceptable environmental and social costs.
- Planning the neighborhood based on spatial rearrangement of the land uses in which the permeable areas are located downstream from the impermeable areas is more effective in lowering runoff volumes than a plan based on augmenting the permeability of the original land cover.
- Detention and retention structural facilities of a reasonable and feasible size, located at the neighborhood's outlet, can decrease the peak runoff discharge that exits from the neighborhood to the value that existed prior to development of the area.
- It can be concluded, based on other studies (EPA 2007), that a WSP-based plan in Givat Zemer will not result in increased expenses, as compared to conventional plans.

Additional conclusions with respect to models, calculations and the required data were reached:

- The SCS model in its standard form is not sufficiently detailed to consider the effect of distributed land uses. This disadvantage can be overcome by using a Distributed SCS model. Implementing this type of model, even though it is more complicated and requires more resources, is advantageous during the comparison of detailed planning options and in the decision process for selecting the preferred plan.

- A complete or at least partial lack of rainfall and other adequate data was detected, including:

Continuous rainfall data at short (5 minute) intervals with sufficient spatial coverage, which is required for calculation of runoff volumes and peak discharges.

Processed rainfall data into intensity-duration-frequency (IDF) graphs or formulae, necessary for calculating the peak discharge.

Permeability data and/or CN coefficients of various soils and land covers – calibrated in Israel – to be used in the SCS model.

Based on the aforementioned conclusions, the following research extensions are recommended:

- Produce a repository of detailed rainfall data of good spatial coverage. The responsibility rests on government agencies (Meteorological Service, Hydrological Service) jointly with regional and local authorities interested in ensuring that the planning in their area is based on reliable data.
- Adjust the SCS model to Israel's conditions. For this purpose it is necessary to calibrate the CN coefficients by means of monitoring projects and measurement in various areas of the country, under different soil and land cover conditions, flora, and various slopes.
- Examine the possibility of implementing the Distributed SCS model that takes into consideration the spatial distribution of land uses, as was performed in the present study. Furthermore, it is also required to examine the differences between the results produced by the standard and Distributed SCS models, since the latter requires detailed data and more complex calculations, which do not always exist and/or require a greater investment to obtain them.
- Create functions and/or models for calculation of the hydrological and hydraulic effects of various WSP means placed throughout the basin (green roofs, permeable pavements, grass channels, surrounding plots with low

walls), as well as various types of structures located within the basin or at its outlet (bio-filters, detention and retention reservoirs).

- Monitor water quality in the runoff in different types of neighborhood and at their outlet, and collecting reliable evidence on the effect of WSP planning on groundwater and runoff.
- Pilot projects: to test WSP approaches and means and examine their effect on the volume, flow rate, and quality of the runoff, with multi-year monitoring and investigations, so as to produce a more reliable basis for planning according to WSP principles.

Table of contents

Abstract.....	1
1. Introduction.....	3
1.1 Research Background.....	3
1.2 Aims and Steps of the Research.....	3
1.3 Research Structure.....	5
2. Scientific Background and Literature Search.....	6
2.1 Runoff - Description of its Formation in the Basin.....	6
2.2 The effects of Development on Hydrology.....	7
2.2.1 Water Quantities – Volumes and Flow Rates.....	10
2.2.2 Quality of the Urban Runoff.....	12
2.3 Water Sensitive Administration – WSA.....	16
2.3.1 Means for the Application of WSA Objectives.....	17
2.3.2 Research and Similar Approaches in the World.....	25
3. Givat Zemer Neighborhood –Case Study.....	30
3.1 Chosen Site - A Neighborhood in the City of Haifa.....	30
3.1.1 Characteristics of the Research Site.....	30
3.2 The Approved Development Plan.....	38
3.3 Potential Damages to the Basin and the Slope as a Result of Developing the Neighborhood.....	40
3.4 Possible design alternative for Givat Zemer development.....	43
4. Procedures and Tools of the Study.....	44
4.1 Choosing the Variables that Describe the Hydrological Behavior of the Basin and the Tools to Quantify them.....	44
4.2 Geographical Information Systems – GIS.....	45
4.2.1 Application of GIS in the Givat Zemer Neighborhood.....	46

Table of contents (continuation)

4.3	Flow Volume Calculation Models.....	47
4.3.1	SCS Model.....	48
4.3.2	Distributed SCS Model: Combination of the SCS Model and GIS.....	52
4.3.3	Examination of the Distributed SCS Model on Simple Field Arrays.....	56
4.4	Model for Calculation of Maximal Flow Rates – The Rational Method.....	62
4.4.1	Creation of an Hydrogram that Represents the Reaction of the Basin to Specific Rain Events.....	66
5.	Application in Givat Zemer Hill: Existing Plan and Alternative Plan.....	71
5.1	Planning Alternatives.....	71
5.2	Choosing the Facilities to Administrate the Flow Rates.....	79
5.2.1	Calculation of the Runoff Volume.....	82
5.2.2	Calculation of the Maximum Runoff Flow Rate.....	86
5.2.3	Maximum Runoff Flow Rate and the Facilities to control it..	89
6.	Summary and Conclusions.....	96
6.1	Introduction.....	96
6.2	Aims of the Research and their Implementation in the Present Investigation.....	96
6.3	Summary of the Calculated Results.....	98
6.3.1	Runoff flow rate at the Neighborhood Outlet.....	98
6.3.2	Runoff Volume at the Neighborhood Outlet.....	98
6.4	Discussion on the Benefits Resulting from the Chosen Neighborhood Plan Based on WSA Administration of the Runoff	100
6.5	General Conclusions Regarding Urban Runoff Administration.....	101

Table of contents (continuation)

6.6	Recommendations for Data Collection and Investigation to Upgrade the Calculations Required to Administrate Urban Runoff Based on WSA Principles.....	102
7.	References.....	104

List of Figures – Correct this list, using what has been changed in the text

Figure 1	– Hydrographs of an undeveloped (rural) and developed basin	10
Figure 2	– Vegetation strip.....	18
Figure 3	– Underground detention and infiltration facilities.....	19
Figure 4	– Green roofs.....	20
Figure 5	– Infiltration pit and filtering cell	21
Figure 6	– Filtering Trees Box.....	22
Figure 7	– Permeable paving surfaces	22
Figure 8	– Givat Zemer Location.....	31
Figure 9	– Carmel Carmel Aquifer cells	34
Figure 10	– Giborim Brook Basin.....	36
Figure 11	– Approved Development Plan	39
Figure 12	– Example of the flow process and the calculation of the Distributed SCS Model	55
Figure 13	– Possible layouts two land uses for Array Number 1.....	56
Figure 14	– Runoff depth versus rain depth for two spatial arrangements of permeable and impermeable surfaces	57
Figure 15	– Spatial pattern No. 2.....	58
Figure 16	– Pattern No. 3 – Simulated neighborhood	59

Figure 17 – Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves, for the rainfall station in the Haifa Port	64
Figure 18 – Unit Hydrograph	67
Figure 19 – Adjustment of the maximum flow of the Unit Hydrograph for a rain event.....	67
Figure 20 – Construction of a hydrograph by summing a number of unit hydrographs.....	70
Figure 21 – Alternative No. 1 - Approved development plan for Givat Zemer	73
Figure 22 - Alternative No. 2 - Proposed development plan for Givat Zemer.....	74
Figure 23 – Comparison of the approved (original) plan and the proposed plan (Alternatives 1 and 2).....	75
Figure 24 – Flow network in the Approved Plan (Alternatives 1 and 1a).....	82
Figure 25 - Flow network in the Proposed Plan (Alternatives 2 and 2a).....	83
Figure 26 – Flow volume at the neighborhood's outlet for four Planning Alternatives for storms of up to 100 mm	85
Figure 27 - Flow volume at the neighborhood's outlet for four Planning Alternatives for storms of up to 60 mm	87
Figure 28 – Frequency of measured rainfall thickness for the years 2001/2-2003/4..	89
Figure 29 – Finding rainfall intensity corresponding to the concentration times in the two development plans for use with the Rational Method.....	91
Figure 30 – Hydrographss for Alternatives No. 1 and No. 2	92
Figure 31 – Comparison between hydrographs of developed and undeveloped basins for the two alternatives - for determining the volume of the storage facility	93
Figure 32 - Schematic of the detention facility	93
Figure 33 – Discharge into and out of the detention facility	95

List of Tables

Table 1 - Main benefits from applying BMPs	24
Table 2 – Common flora in Givat Zemer	32
Table 3 – Recharge and pumping data for Carmel aquifer cells (The Hydrologic Service, 2007).....	34
Table 4 – Land uses in approved developing plan	40
Table 5 - Infiltration rates of saturated soils (Carmon and Shamir, 1997, p. 163, from Amos Hadas, Agricultural Research Service).....	49
Table 6 – Comparison between runoff volumes for the flow network presented in Figure 12.....	54
Table 7 – Runoff received, infiltrated and generated in a linear polygon for rain intensity of 50 mm	59
Table 8 – Comparison of runoff volumes between different calculation methods for the land use pattern in figure 16.....	60
Table 9 – Runoff flow rates coefficients (ASCE 1969, in Viessman & Lewis, 1977).....	65
Table 10 – Constructing a combined hydrograph by summing representative hydrographs	70
Table 11 - Comparison of land uses between the original plan (Alternative 1) and the proposed plan (Alternative 2).....	76
Table 12 – CN_c values for different land uses	79
Table 13 – Choosing CN_c values for different land uses	81
Table 14 – Percentage of land uses in the neighborhood, CN coefficients, and weighted coefficient for the neighborhood, for the Approved Plan (Alternatives 1 and 1a) and the Proposed Plan (Alternatives 2 and 2a) without and with BMPs.....	84
Table 15 – Maximum daily runoff depth for each month, Haifa Port rainfall station, measurements taken since 1952.....	85
Table 16 – Cumulative annual rain and runoff volumes for 3 years for the four Alternatives	88
Table 17 – Concentration time for the undeveloped basin and the two development plans for different return periods, 3,5 and 10 years and maximum runoff flow rates for return period of 5 years	90

Pictures list

Picture 1 – Vertical ground section in exposed ground at the northern side of Givat Zemer (seen from Hankin Road).....32

Picture 2 – A flooded road near Paz Bridge, taken on 01/11/09.....37

Picture 3 and 4 – Damage in Giborim Brook Basin resulting from high flow rates ...42