



2

**WATER SENSITIVE URBAN PLANNING:
ANALYZING ALTERNATIVES FOR INCREASING
INFILTRATION IN URBAN PUBLIC SPACES**

RESEARCH THESIS

**SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CIVIL ENGINEERING
(HYDRODYNAMICS AND WATER RESOURCES)**

ANNA LEVIN

הספרייה המרכזית ע"ש אלישר
מס' 2231204 מערכת

**SUBMITTED TO THE SENATE OF THE TECHNION - ISRAEL INSTITUTE
OF TECHNOLOGY**

Nisan 5761

Haifa

March 2001

ABSTRACT

Urbanization results in impermeable areas (paved roads, parking lots, roofs, etc.) over a significant portion of the previously natural or undeveloped landscape, which prevents the infiltration of excess rainfall into the soil and possible groundwater recharge, and also tends to increase, as well as accelerate, surface runoff.

The subject of this work is to study some stormwater management alternatives the application of which leads to infiltration increase.

The present study deals with public urban areas assuming that they are more accessible for implementation and maintenance of different alternatives than private urban areas.

The work uses the Hydrologic Micro Model (HMM) developed by Kronaveter (1998), based on the Green-Ampt infiltration equation and on a combination of Manning's and non-linear reservoir equation for surface flow. Outflow from the roof area is approximated by the outflow from a reservoir with the opening in the shape of a weir. HMM provides event based and continuous simulations, and enables to evaluate the hydrologic response of urban watersheds as a result of implementation of different stormwater management alternatives like "impervious surfaces directly connected to the drainage network", "impervious surfaces connected to the pervious parts of watershed", "impervious surfaces connected to an underground facility" and their combinations.

The study deals with continuous (annual based) simulations applied to the neighborhood Kiryat Ganim (in Rishon Le-Zion), which is located on the Israeli coastal plain, that has high infiltration capacity soils and lies over the coastal aquifer.

The assumption is that the rainwater is of good quality for infiltration and groundwater recharge.

The work shows that connecting impervious areas to pervious surfaces or/and an underground facility can increase significantly the infiltration and reduce the runoff. For average infiltration capacity soils ($K_s = 30$ mm/hr) and average annual rainfall (606 mm), it is possible to avoid almost completely surface runoff from impervious surfaces by connecting the impervious areas to pervious areas of the watershed which have the same or larger area of the impervious surfaces. When the pervious-impervious area ratio of the catchment ranges from 1/10 to 1/3 the infiltration increase and consequently runoff

reduction as a result of connecting the impervious areas to a pervious area is almost constant and equals 60% of annual rainfall.

If it is impossible or undesirable to direct the runoff from impervious surfaces to pervious open areas, underground infiltration facilities can be installed. The installation of underground trenches is more effective than connection to open areas of the same size as trench bottom and same soil parameters. It happens first of all due to infiltration through trench sides and also because the trench accepts the runoff from the area connected to it, while a pervious area has to infiltrate the rainwater that falls directly on it in addition to the runoff water that flows to it from other areas.

The combined application of the alternatives can eliminate surface runoff in urban areas and, thus, allows the return of rainwater to the path it took before urban development has occurred. In this case infiltration may recharge the aquifer with more water than before development by forcing into recharge some of the water that would have been lost otherwise.

Unfortunately, the lack of experimental data does not allow validation of the simulation results. Therefore it is recommended to continue efforts in field experiments as a means of verifying that model results can be used to guide planning.

Li

A

d-

d_p

E-

El

f-

f_p

F-

Fs

H-

H_0

I-

i-

I_{ef}

IM

IM

Ks

L-

L_s

LE

n-

P-

Q-

Q_m

Q_{α}

R-

S-

t-

Δ -

תכנון עירוני רגיש למים: ניתוח חלופות להגדלת החלחול בשטחים
עירוניים ציבוריים

חיבור המחקר

לשם מילוי חלקי של הדרישות לקבלת תואר מגיסטר למדעים
בהנדסה אזרחית (הידרודינמיקה ומשאבי מים)

אנה לוין

הוגש לסנט הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל

מרץ 2001

חיפה

ניסן תשס"א

תקציר מורחב

העבודה הנוכחית היא אחת מן העבודות במסגרת המחקר "תכנון עירוני רגיש למים" שהתחיל בטכניון בשנת 1993. בעבודה הראשונה (עבודת מחקר של סיגלית מירון-פיסטנר) נבחנה שכונה טיפוסית בשנת התשעים (קריית גנים בראשון לציון) מבחינת הכמויות השנתיות של חלחול ונגר על קרקעי תוך שימוש בשיטה SCS (Soil Conservation Service). בדר"ח של פרופ' נעמי כרמון ופרופ' אורי שמיר (1997) נעשו חישובים והשוואות תוצאות לאותה שכונה בעזרת שיטה SCS ו-SWMM. לאחר מכן לאה קרונבטר בעבודת המאסטר שלה פיתחה מודל HMM (Hydrologic Micro Model) לחישוב התגובה ההידרולוגית של אזור עירוני עבור חלופות שונות של ניהול מי הנגר. על סמך תוצאות שהושגו באמצעות התוכנית זו במסגרת עבודת מאסטר של שרון כץ ניתנו המלצות לתכנון ועיצוב של שטחים פרטיים כגון: חצר וגינה של הבית העירוני. העבודה הנוכחית היא המשך של עבודות הנ"ל והיא מתייחסת לשטחים ציבוריים עירוניים.

מטרת המחקר היא לגבש עקרונות לתכנון השטחים הציבוריים בעיר, ברמת המבנן והשכונה (רמת מזו), אשר יתרמו לצמצום ההשפעות השליליות של הפיתוח עירוני על כמות ואיכות מי התהום באקוויפר החוף. הנחת המחקר היא שתכנון נטו של השטחים הציבוריים ושימוש באמצעים טכנולוגיים והנדסיים מתאימים יכול להקטין את כמות הנגר העילי המצטבר ואת אבדן מי הנגר לאקוויפר.

שלבי העבודה

- (1) לימוד ההשפעות ההידרולוגיות המלוות פיחות עירוני.
- (2) לימוד אמצעים המסוגלים למנוע או להקטין ההשפעות הבלתי רצויות.
- (3) לימוד מודלים קיימים המתאימים לאגני ניקח עירוניים המסוגלים לתאר חלופות שונות של תכנון.
- (4) לימוד תוצאות של מחקרים קודמים ומסקנות.
- (5) בחירת מודל מתאים וניתוח רגישות שלו.
- (6) לימוד השטח הנבחר (שכונה קריית גנים שבראשון לציון) וקביעת הנתונים הנדרשים לחישובים.
- (7) יישום המודל לשכונה הנבחרת, עיבוד התוצאות והצגת מסקנות לחלופות שונות.
- (8) השוואת יעילות החלופות.
- (9) סיכום ומסקנות.
- (10) המלצות לתכנון עירוני של שטחים ציבוריים.

פיתוח עירוני גורם להשפעות שליליות על סביבה, כגון:

- הגדלת כמות ועוצמות הנגר העל-קרקעי,
- הקטנת הלחול והעשרת מי התהום,
- ירידה באיכות המים והקרקע.

פתרון נכון של בעיות אלה חשוב מאוד למדינת ישראל. האזור שמתפתח במהירות הוא מישור החוף ישראלי, בעל קרקעות עם מוליכות גבוהה, הנמצא מעל אקוויפר החוף שמספק כ- 25% מצריכת המים השפירים של המדינה. לכן חשוב מאד לשמור על כמות ואיכות המים באקוויפר החוף בלי להגביל את פיתוח העירוני במישור החוף.

במשך שנים רבות המדיניות היחידה של טיפול במי הנגר הייתה לסלק את כל עודפי מי הגשם למערכת הניקח מהר ככל האפשר. לאחרונה החלו בהרבה מדינות בעולם לטפל בבעיית ניהול מי הנגר תוך שימוש ב- "תכנון עירוני רגיש למים" תוך שימוש באמצעים שונים, למשל טיפול במי הגשם במקום שהם יורדים (On-Site Stormwater Management), החדרת מי הנגר משטחים אטומים בשטחים חדירים, שימוש במתקני החדדה (תעלת החדרת תת קרקעית, באר להחדרת המים, מדרכה חדירה וכ"ו), או אפשרות של עצירת ואגירת מי הנגר (בריכה יבשה פתוחה, בריכה עם מפלס מים קבוע, בריכה עם מפלס מים המשתנה וכ"ו). הניסיון מראה שמתקני אגירה הם יותר פשוטים מבחינת ניתוחם ההידראולי, אבל הם דורשים שטח גדול והם יותר יקרים.

העבודה הנוכחית מציגה שני סוגי מקדמים המייצגים המאזן ההידרולוגי:

מקדם נגר העל קרקעי – היחס בין כמות הנגר העל קרקעי וכמות הגשם. מקדם זה מאפיין את הפיתוח העירוני. כאשר יש יותר שטח אטום בתוך האגן העירוני הוא פחות רגיש לסוגי הקרקע. במילים אחרות פיתוח עירוני טיפוסי נותן בערך אותו מקדם נגר על קרקעי לאזורים עם פיתוח עירוני זהה.

מקדם הפסדי מים – הפרש בין כמות הנגר העל קרקעי אחרי פיתוח לבין כמות הנגר העל קרקעי לפני פיתוח חלקי כמות הגשם. מקדם זה חשוב מפני שהוא מראה את השינויים במאזן ההידרולוגי כתוצאה מהעיוור. קשה להשיג ערך זה מן הספרות. בעיקר משום שאין נתונים על המצב לפני הפיתוח. את המחקרים העוסקים בנושא זה ניתן לחלק לשתי קבוצות עיקריות:

(1) עבודות מבוססות על מדידות בשטח.

(2) עבודות מבוססות על הערכה אנליטית:

- שיטות 'פשוטות'.

- שיטות סימולציה (שיטות ממוחשבות).

ניתוח תוצאות של מחקרים קודמים מראה כי:

עבודות המבוססות על מדידות בשטח ושיטות אנליטיות 'פשוטות' נותנות מקדם נגר על קרקעי לאזור עירוני בסביבות 0.30, פרט לעבודות המתייחסות לשטח גדול או זמן קצר, אשר בהן הערכים נמוכים יותר.

עבודות ממוחשבות נותנות מקדם נגר על קרקעי בדרך כלל כפונקציה של אחוז השטח האטום בתוך האגן העירוני, והערך המתקבל הוא גדול יותר. ניתן להניח שבשיטות אנליטיות 'מסובכות' יש אומדן יתר כתוצאה מההנחות.

המודל הנבחר לצורך המחקר הוא **HMM Hydrologic Micro Model** (Kronaveter, 1998).

הקריטריונים לבחירת מודל הידרולוגי המתאים למחקר שלנו היו:

- (1) מודל המחשב את כמויות המים של מרכבי המאזן בפרקי הזמן של נתוני הגשם.
- (2) מסוגל לתאר התנהגות הידרולוגית של אגן היקוות עירוני עבור חלופות ניקח שונות.
- (3) מתאים לסימולציה שנתית רצופה.
- (4) ללא הגבלות לשימוש באזור יבש.
- (5) פועל במחשב אישי.
- (6) ידידותי למשתמש.
- (7) זמינות המודל.

מודל HMM כולל:

מודל גג: סימולציה של אוגר, התאדות חרימה משטח הגג.

מודל שטח: סימולציה של חלחול, התאדות חרימה על פני שטח חדיר (גנים, פרקים ציבוריים וכ"ו), והתאדות חרימה על פני שטח אטום (כבישים, מזרקות ושטחים מרוצפים אחרים).

מודל תעלת החדרה תת קרקעית: סימולציה של חלחול מתוך מתקן החדרה.

מסקנות על המודל HMM מבוססות על ניתוח רגישות ותוצאות של מחקרים קודמים:

- (1) HMM הוא מודל של כמויות מים.
- (2) השימוש ב-HMM לאירועי גשם "קצרים" דורש תשומת לב מיוחדת של המשתמש.*
- (3) רגישות מעטה לשינויים ביחס רוחב-אורך של אגן ההיקוות לסימולציה וציפה שנתית.
- (4) מתאים לשטחים עם שיפוע קטן מ-0.03.
- (5) יש כנראה אומדן יתר בכמות הנגר המחושב כתוצאה מההנחות של המודל (כיווני הזרימה, חוסר שינויים בהתאדות וכ"ו).
- (6) התגובה ההידרולוגית של שטח המורכב מכמה חלקים שווה לסכום התגובות ההידרולוגיות של החלקים.
- (7) אינו מתאים לגגות משופעים.

*הערה: תהליך החלחול מתואר בעזרת משוואה Green-Ampt. כיוול המודל עשוי לעוצמות גבוהות יחסית למוליכות הידרולית של הקרקע (עוצמות פי 2, 4, 6 ו-8 גדולות ממוליכות הידרולית). השאלה המתעוררת היא: מהי היכולת החיזוי של השיטה זו לתנאי אקלים של חוף ישראלי – עוצמות הגשם יחסית נמוכות ויכולת ספיגת מים בקרקע גבוהה?.

תאור השטח הנבחר: שכונת קריית גנים בראשון לציון, שכונת מגורים אופיינית לבנייה בשנת ה-90. שטח של השכונה הוא 460 דונם (לא כולל פרק החולות). השטח הציבורי תופס 56% (בתוכו 74% שטח אטום ו-26% שטח חדיר) והשטח הפרטי (שטח המגרשים מבני המגורים) – 44% (בתוכו 54% שטח אטום ו-46% שטח חדיר).

חלופות לניהול מי הגשם בשטחים ציבוריים הנבחנו במחקר הנוכחי הן:

- חלופה 1: ניקח מקובל (שטח אטום מתנקז באופן ישיר למערכת הניקוח).
- חלופה 2: חיבור של שטחים אטומים (גגות או/ו-1 שטח מרוצף) לשטחים חדירים (שטח פתוח).
- חלופה 3: חיבור של שטחים אטומים (גגות או/ו-1 שטח מרוצף) למתקני החדרה (תעלה תת קרקעית).
- בנוסף: חיבור חלופה 2 ו-3.

סיכום ומסקנות:

(1) להערכה גסה של כמויות שנתיות של חלחול, נגר על קרקעי והתאדות באזור עירוני המתנקז למערכת הניקוז (חלופה 1) במקום סימולציות של מודל HMM ניתן להשתמש בנוסחות הבאות:

$$\begin{aligned} & \% \text{ חלחול} \sim (1 - \% \text{ התאדות} / 100) * \% \text{ שטח חדיר} \\ & \% \text{ נגר על קרקעי} \sim (1 - \% \text{ התאדות} / 100) * \% \text{ שטח אטום} \\ & \% \text{ התאדות} \sim 11\% - 15\% \text{ מגשם שנתי} \end{aligned}$$

(2) כתוצאה מההנחות של המודל, שינויים בכמות ההתאדות מחלופה לחלופה לא משמעותיים, ומכאן שאחוז הקטנת הנגר שווה בערך לאחוז הגדלת החלחול ושניהם נקבעים על ידי יחסי השטח החדיר והאטום מתוך חלק הגשם הנותר לאחר ההתאדות.

(3) החלופות התכנוניות 2 ו-3, וחיבור חלופה 2 וחלופה 3 מאפשרים הגדלה משמעותית של כמות החלחול והקטנת מי נגר העל קרקעי.

(4) חלופות אלה מאפשרות להחדיר לקרקע כמעט את כל מי הנגר מהגג. בגלל אחוז נמוך של שטח הגג בחלק ציבורי של השכונה, התרומה של חיבור זה לא כל כך משמעותית (ללא התייחסות לסוג החיבור).

(5) כתוצאה מדרך שונה של חישוב ההתאדות בחלקים שונים של התוכנה, מתקבל בחישובים שהחיבור של שטחים מרוצפים יותר יעיל מאשר חיבור הגגות.

6) חלופה 2.

לקרקעות בעלי מוליכות הידרולית ממוצעת לאזור החוף הישראלי ($K_s = 30 \text{ mm/hr}$):

- אם השטח הציבורי החדיר הוא 10% מן השטח האטום - כמות החלחול שווה ל- 66.5% וכמות הנגר - 19%, במקום 8.3% ו- 77.2% לפני החיבור, בהתאמה.
- כאשר מחברים את השטח האטום לשטח חדיר ששטחו בין עשירית לשליש מן השטח האטום, גדלה כמות החלחול (והנגר קטן בהתאמה) בכ- 60% מכמות הגשם השנתי.
- הורדת כמות הנגר עד ל- 10% דורשת חיבור השטח האטום לשטח חדיר ששטחו חמישית מן שטח אטום (השטח חדיר חייב להיות 1/6 מסה"כ שטח האגן).
- כדי למנוע זרימת מי הגשם על פני הקרקע ולהחדיר את כל הנגר, השטח החדיר פתוח חייב להיות שווה או יותר גדול משטח אטום.

7) חלופה 3.

- תעלה תת קרקעית יעילה יותר משטח חדיר באותו גודל, הודות לחלחול דרך צידי התעלה (הקירות) וגם מפני ששטח חדיר אליו מחובר שטח אטום חייב לטפל במי הגשם שיורדים עליו בנוסף לעודפי המים המגיעים משטח אטום.
- כאשר יחס בין שטח חדיר ומרוצף הוא 0.3:
 - הגדלת החלחול ל- 10% דורש תעלה עם תחתית של 35 מ"ר
 - ל- 20% - 90 מ"ר
 - ל- 30% - 180 מ"ר
 - ל- 40% - 330 מ"ר
 - ל- 50% - 630 מ"ר.
- לקרקעות עם חדירות נמוכה היעילות של חיבורים אלה נמוכה פי 2 עד 3 מאשר לקרקעות עם חדירות ממוצעת. לקרקעות עם חדירות גבוהה היעילות של חיבורים אלה גבוהה פי 2 עד 4 מאשר לקרקעות עם חדירות ממוצעת.
- אפשר להשתמש בחלופה 3 כתוספת לחלופה 2, או כפתרון בלעדי כאשר החיבור של שטחים אטומים לשטח חדיר פתוח לא אפשרי או לא רצוי.
- חיבור זה (בטור) מאפשר להחדיר את הנגר בשטח העירוני ולהחזיר את מחזור ההידרולוגי למצב לפני פיתוח.

המלצות לתכנון עירוני של שטחים ציבוריים:

- לקרקעות עם מוליכות הידרולית ממוצעת למישור החוף ישראלי ($K_s = 30 \text{ mm/hr}$) וגשם שנתי ממוצע (בערך 600 מ"מ):
- 1) כדי להחדיר את מי הגשם תוך שימוש בחלופה 2 מומלץ לשמור יחס בין שטח חדיר ואטום לפחות 1:1. במצב זה אפשר למנוע (כמעט לחלוטין) נגר על-קרקעי ע"י החיבור של שטח אטום לשטח חדיר.
 - 2) במצב שאי אפשר להשאיר 50% משטח אגן עירוני כשטח פתוח עדיין מומלץ ליישם את חלופה 2 ולחבר את השטח האטום לשטח חדיר ששטחו שליש מן השטח אטום. אפילו במקרה זה הגדלת החלחול והקטנת הנגר העל-קרקעי היא משמעותית (60% ויותר מגשם שנתי עבור שטח חדיר המהווה עשירית מן השטח האטום). את העודפים ניתן לכוון למתקן החדרה.
 - 3) כאשר חיבור שטחים אטומים לחדירים אינו אפשרי או לא רצוי, מתקני החדרה יכולים להוות פתרון טוב.

הערות

המחקר הנוכחי לא מתייחס לאיכות מי הנגר. התגובה ההידרולוגית של שטח מסוים היא פונקציה של פרמטרים שונים, כגון: יחס של שטח חדיר ואטום, חדירות הקרקע, שיפועים, טופוגרפיה, וכו'. לכן: אין למעשה הבדל בין התגובה ההידרולוגית של שטח ציבורי ושטח פרטי. מאידך: הגישה והשליטה בשטח ציבורי אפשרית יותר, ולכן אפשר להניח שניתן לבצע שם ביתר הצלחה תכנון עירוני רגיש למים.

בהעדר נתונים אמפיריים אי אפשר לאשש את התוצאות של סימולציות.

המלצות:

- (1) לבצע ניסויים בשטח, על מנת שניתן יהיה לאמת את תוצאות החישובים ולבסס את ההמלצות לתכנון עירוני רגיש למים (ניסויים אחדים נמצאים כעת בביצוע, אבל יש צורך בהרבה יותר).
- (2) דרוש לנסות בשטח את החלופות המוצעות, על מנת לקבוע את ישימותן, מבחינת:
 - (א) הבטחת פעולה יעילה שלהן לאורך זמן (אחזקה);
 - (ב) המקום המתאים לשטחים המחדירים ולהקמת מתקני ההחדרה, על מנת למנוע הצפות ונזקים לבניינים ותשתיות.
- (3) למדוד את איכויות מי הנגר במקומות שונים, לבחון התאמתם להחדרה.