

# הורדת רמת הפחת הנובע מאיבוד מים במערכות אספקת מים על ידי שימוש במפחית ספיקה לא נמדדת (מסל"ן – Unmeasured Flow Reducer - UFR) - מקרי מחקר

שרון יניב\*

\*א.ר.י. אבזרים להולכת נוזלים, קיבוץ כפר חרוב, 12932, ישראל.

## תקציר

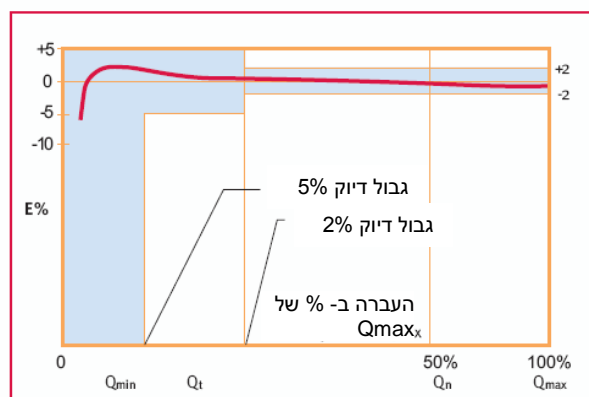
צריכת המים בעולם עולה עם הגידול בהיקף האוכלוסייה וההתפתחות הטכנולוגית בעוד מקורות המים השפירים הולכים ואוזלים. קיים צורך חיוני למציאת פתרונות חדשניים המפחיתים את איבודי המים במערכות אספקת מים. מרבית מדי המים אינם מודדים מים הזורמים בספיקה הנמוכה מ-12 ליטר לשעה. הפתרון החדשני, UFR (מסל"ן - מפחית ספיקה לא נמדדת – Unmeasured Flow Reducer) הוא מוצר של חברת א.ר.י. אבזרים להולכת נוזלים. מטרתו העיקרית היא הורדת רמת הפחת על ידי שינוי משטר הזרימה דרך מד המים בספיקות נמוכות. כך קטן נפח המים שאינו נמדד בספיקות נמוכות ומתאפשרת מדידה של נזילות באמצעות מד מים ביתי. מאמר זה סוקר את שגיאת עקומת דיוק מד המים, הורדת רמת הפחת באמצעות UFR – אופן פעולה ומקרי מחקר שבוצעו במקומות שונים בעולם.

## מילות מפתח

פחת, UFR, מסל"ן, שגיאת עקומת דיוק מד מים.

## הקדמה

הפסדים לכאורה (הנקראים במקרים רבים הפסדים לא פיזיים, הפסדים על הנייר או הפסדים מסחריים) מהווים במקרים רבים את הפסדי המים היקרים ביותר המתרחשים במערכת מים. מד המים הוא הקופה הרושמת של מתקן המים ולפיכך כל הפסד הנובע מצידוד המדידה או מהטיפול והעיבוד של הנתונים לאחר מכן יאבד כערך הכנסה ממכירות ליחידת מידה (Thornton and Rizzo, 2002). קיימות ארבע סיבות עיקריות לפחת: שגיאה בעקומת הדיוק של מד המים, שגיאות בהעברת נתונים, שגיאות בניתוח נתונים וצריכה לא מורשית. שגיאת דיוק מד המים נחשבת כרכיב משמעותי בפחת במערכת מים. עקומת השגיאה של מד המים (תרשים 1) יכולה להשפיע על נפח המים שאינו נמדד. לכל סוג מד מים יש קצב משלו של הירידה בדיוק לאורך זמן. מד המים עשוי להיות מושפע מפרמטרים חיצוניים כגון איכות המים (אבנית, חול וכד') ותרחיפים.



תרשים 1: עקומת השגיאה של מד מים

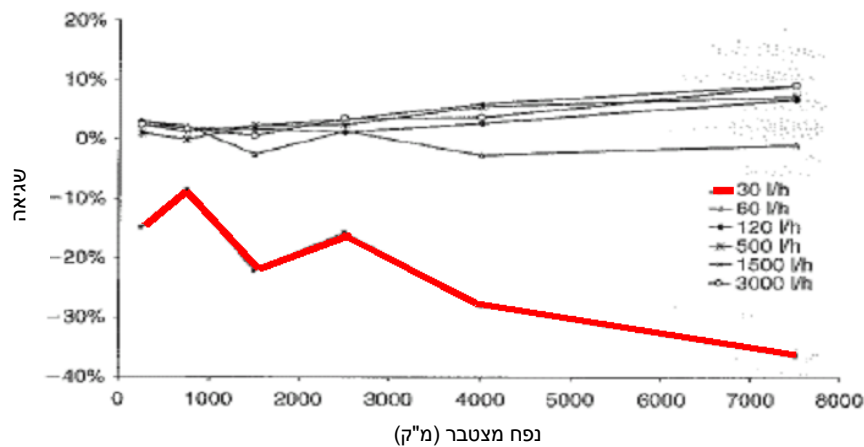
תקן ISO (ISO 4064-1, Second edition, 1993) מגדיר את הביצועים של כל סוג של מד מים על ידי בחינת 4 נקודות עיקריות לאורך תחום הספיקה:  $Q_{min}$ ,  $Q_t$ ,  $Q_n$ ,  $Q_{max}$ . אין כל התייחסות לזרימה ההתחלתית (בדרך כלל שליש של  $Q_{min}$ ), שאותה מד המים מתחיל למדוד.  $Q_{min}$  היא הזרימה המינימלית המדויקת, בדיוק של  $\pm 5\%$  של  $Q_t$  היא זרימת המעבר, שבה מד המים מספק ביצועים יציבים, בדיוק של  $\pm 2\%$  של  $Q_n$  היא הזרימה הנקובה (נומינלית) של מד המים.  $Q_{max}$  היא הזרימה המרבית; ערך זה נקבע ככפול מהזרימה הנקובה. תרשים 1 מציג את התרחיש האידיאלי עבור מד מים חדש לחלוטין (Multi-jet class B), לצידוד ישן יותר תהייה עקומת דיוק המוסטת החוצה מתחום  $\pm 2\%$  דיוק של העקומה האידיאלית. ההשתנות בזרימות חלשות גבוהה

הרבה יותר מאשר בזרימות בינוניות וגבוהות, עקומת השגיאה תלולה עד שהיא מגיעה לקצב הזרימה המינימלי. כתוצאה מכך, חוסר הוודאות לגבי הביצועים האמיתיים של מדי מים בזרימות חלשות יהיה תמיד גדול יותר מזה שבזרימות גבוהות יותר (Arregui el. 2006).

### מדי מים ביתיים

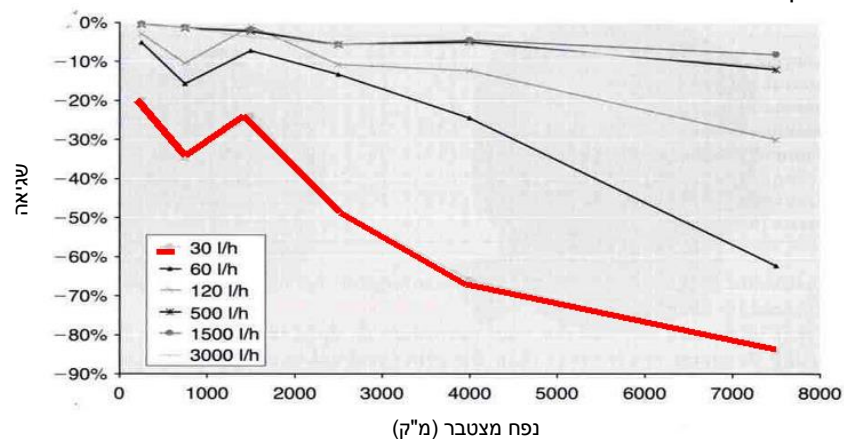
מרבית מדי המים הביתיים הם בדרך כלל מהירותיים: זרימה בודדת, מספר זרימות; העברה: תנועת בוכנה ודיסקה מסתובבת.

מדי מים מהירותיים מושפעים מעיוותי זרימה או שינויים ממדיים במד המים העלולים להפריע למהירות הפנימית של הזרימה העוברת דרך הציוד. מדי מים מהירותיים גם רגישים לכל גידול במומנט הסחף על רכיב החיישן במיוחד בזרימות חלשות. מיקום התקנה שגוי של מד המים מגביר את החיכוך של החלקים הנעים. השפעה זו ניכרת רק בזרימות חלשות שעבורן גורם זה משמעותי במומנט הסחף האפקטיבי. אם מיקום ההתקנה שגוי, ואינו מתאים להמלצות היצרן, הדבר עלול להגביר את קצב הפגיעה בדיוק מד המים. השחיקה של החלקים הנעים מגבירה את השגיאה בקצבי זרימה חלשים (תרשים 2). משקעים עלולים לגרום למדידת יתר בזרימות בינוניות-גבוהות ולתת-מדידה בזרימות חלשות. עם זאת, לטווח ארוך, המשקעים גדלים לרמות גבוהות עד כדי כך שהן עלולות למנוע את סיבוב הרוטור, באופן זמני או קבוע, ולגרום לתת-מדידה חמורה במיוחד של מד המים (Arregui el. 2005).



**תרשים 2:** שגיאת Multi-jet (זרימה נקובה של 1.5 מ"ק לשעה) על נפח מצטבר (Arregui el. 2006, p.21)

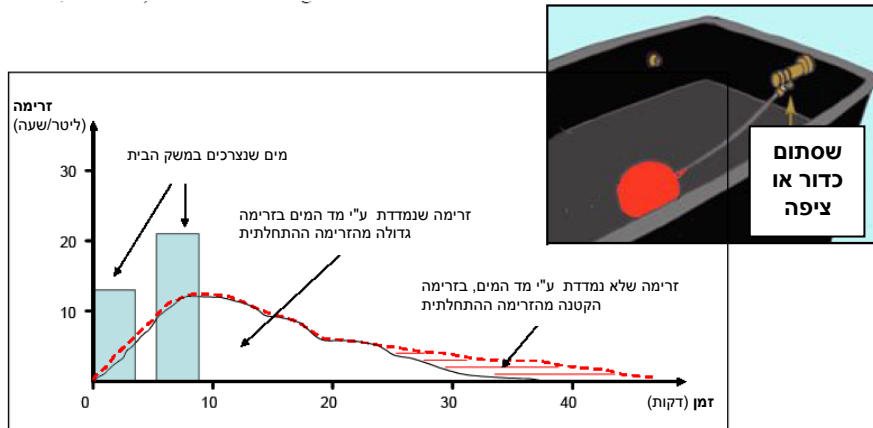
מדי מים בשיטת 'העברה' משמשים בעיקר לשימושים ביתיים הודות לרגישות המעולה שלהם לספיקות נמוכות ולדיוק הרב שלהם על פני מיגוון רחב של ספיקות. נפח ידוע של נוזל בתא סגור נע עם זרימת המים, והספיקה מחושבת על סמך מספר הפעמים שהתא מתמלא ומתרוקן. ירידה בנפח בפועל של כל תא אינה אפשרית, שכן הדבר יגרום למד המים לעצור. לכן, אין מצב של מדידת יתר ועקומת השגיאה תהיה שלילית יותר (תת-מדידה) (תרשים 2). כתוצאה מכך, מדי מים אלה נוטים למדוד ערכים נמוכים יותר ביחס לשימוש בפועל במים ככל שהציוד ישן ושחוק יותר.



**תרשים 3:** התפתחות שגיאת המדידה הנובעת מדגימה של מדי מים נפחיים (1/2") (Arregui el. 2006, עמ'

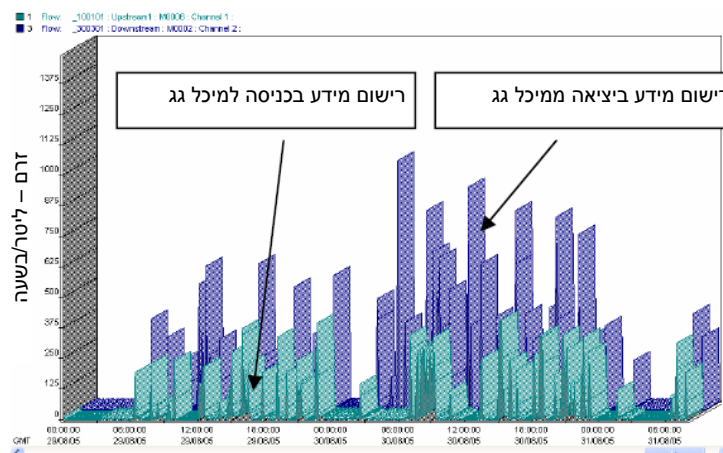
## מיכלים על גגות

צריכת המים בזרימות חלשות היא הקשה ביותר למדידה. כפי שניתן לראות בכל עקומת דיוק של כל מד מים, שגיאות המדידה גבוהות הרבה יותר בתחום זה. בתנאי עבודה אלה, העברת האנרגיה מהנוזל לרכיב החישה קטנה מאוד וכל גידול בחיכוך, הנגרם על ידי גורם כלשהו, עלול לעצור את הרוטור או את הבוכנה בקצבי זרימה נמוכים יותר. לכן, תת-המדידה הצפויה ממד מים המותקן אצל משתמש הצורך כמויות גדולות של מים בקצבי זרימה איטיים תהיה גדולה מאוד. בנוסף, תוך התייחסות לכך שדיוק מד המים פוחת בקצב מהיר יותר בזרימות חלשות, תת-המדידה תגבר במהירות גבוהה יותר בהשוואה למשתמשים מסוג אחר (Arregui et. 2006).  
 תרשים 4 מציין את ההשפעה של שסתום כדורי במילך על גג על פרופיל הזרימה של בית מגורים רגיל. מערכת צנרת לא ישירה כוללת בדרך כלל את המטבח הביתי המקבל אספקה ישירות מלחץ המים הראשי הנכנס בעוד שיתר הבית מקבל אספקה בכוח הכובד ממילך הנמצא על הגג. הסגירה האיטית של השסתום הכדורי של המילך שעל הגג היא זו שגורמת לזרימות שהן נמוכות יותר מזרימת ההפעלה של מד המים, כפי שניתן לראות בתרשים 4 לעיל. ככל ששטח הפנים של המילך על הגג גדול יותר או ככל שזרם ההפעלה של Qs של מד המים גבוה יותר, כך תת-המדידה של מד המים תהיה חמורה יותר (Rizzo and S. John, 2006).



תרשים 4: ההשפעה של מיכל גג על תת-מדידה של מד המים (Rizzo and S. John, 2006)

תרשים 5 מציג את התוצאה של בדיקות חוזרות שבוצעו על מיכלי גג סטנדרטיים בגודל 1 מ"ק. רישום הנתונים התבצע עם מדי מים שמוקמו במעלה הזרם ובמורד הזרם ביחס למיכל שעל הגג. ההיגיון שמאחורי בדיקות אלו היה שבעוד שמד המים המותקן במעלה הזרם ביחס למיכל הגג יציג תת-מדידה משמעותית כתוצאה מהשפעת השסתום הכדורי, מד המים שבמורד הזרם ביחס למיכל יפעל פחות או יותר במדויק. זאת מכיוון שמרבית הזרימות החוצה מהמיכל יהיו מעל Qs או אפילו מעל Qmin. התוצאות אישרו את ההנחה והקריאות במורד הזרם היו גבוהות בלמעלה מ-6% ביחס לקריאות במעלה הזרם, והצביעו על כך שמד המים במעלה הזרם ביצע תת-מדידה של למעלה מ-6% של הצריכה היומית כתוצאה מהשפעת השסתום הכדורי. החלפת מד המים החדש במעלה הזרם במדי מים ישנים יותר (שנשחקו יותר) הפיקה נתוני תת-מדידה שנתו בין ה-6% המקוריים ועד 95%. כל הבדיקות בוצעו תוך שימוש במדי מים נפחיים מסוג Class D ( $Q_n = 1.0m^3/Hr$ ) (Rizzo and S. John, 2006).

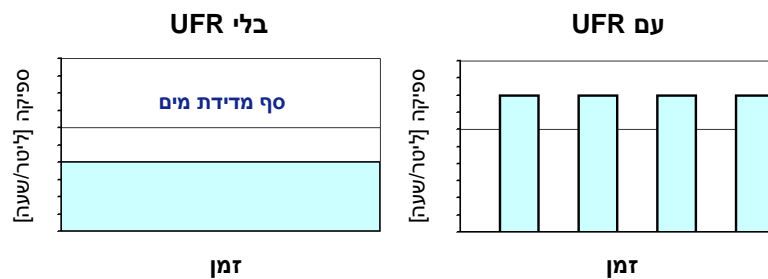


תרשים 5: רישום נתונים של מדי מים בכניסה וביציאה של מיכל מים על הגג (Rizzo and S. John, 2006)

## UFR - Unmeasured-Flow Reducer (מסל"ן – מפחית ספיקה לא נמדדת)

ה-UFR (תרשים 6) פועל על ידי כך שהוא משנה את אופן זרימת המים דרך מד המים בספיקות נמוכות. בספיקות נמוכות אין מספיק אנרגיה בזרימה להפעלת המדידה במד המים. ה-UFR מתחיל לפעול בספיקות נמוכות מאוד ויוצר מנות של זרימה שאותן מד המים יכול למדוד (תרשים 7). כתוצאה מהשינוי באופן זרימת המים והחלוקה למנות, ה-UFR מאפשר למד המים למדוד ספיקות נמוכות.

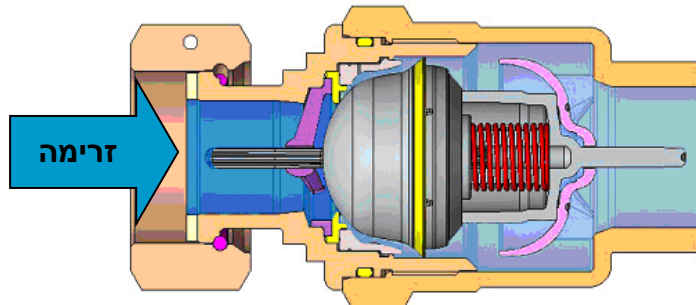
**תרשים 6:** UFR - Unmeasured-Flow Reducer (מסל"ן – מפחית ספיקה לא נמדדת)



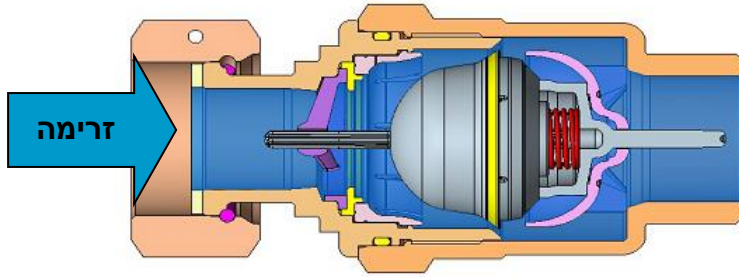
**תרשים 7:** UFR - עיקרון פעולה

ה-UFR מווסת את זרימת המים כך שאין כל זרימה בחלק מהזמן, ואילו בשאר הזמן הזרימה חזקה מספיק כדי שניתן יהיה למדוד אותה. שינויים במשטר הזרימה בספיקות נמוכות מאפשרים למד המים הקיים למדוד את כל הספיקות העוברות דרכו. כאשר הספיקה עולה מעל סף יכולת המדידה של מד המים, ה-UFR נשאר פתוח באופן קבוע, כך שהוא אינו מפריע למדידות. ה-UFR גם פועל כשסתום אל-חזור ומונע זרימה לאחור (הוא נסגר כאשר הלחץ במורד הזרם והלחץ במעלה הזרם שווים).

ה-UFR הוא שסתום אל-חזור דיפרנציאלי, המתוכנן כך שהפרש הלחצים הדרוש לפתיחתו גדול מההפרש הדרוש כדי להשאירו פתוח. הפרש הלחצים לפתיחת ה-UFR הוא 0.4 בר, בעוד שהפרש הלחצים הדרוש כדי להשאירו פתוח הוא 0.1 בר. כאשר מתפתחת נזילה (ספיקה שהיא נמוכה יותר מסף המדידה של מד המים) הלחץ במורד הזרם יורד. כאשר הלחץ במורד הזרם יורד אל מתחת ל-0.4 בר פחות מזה שבמעלה הזרם, ה-UFR נפתח ומאפשר ספיקה גבוהה מזו של סף המדידה (תרשים 8). הזרימה החופשית של מים דרך ה-UFR משווה לחצים בין קצוות ה-UFR ואז הוא נסגר (תרשים 9). המשך הנזילה במורד הזרם ביחס ל-UFR יגרום לחזרה על פעולות אלה שוב ושוב. בכל פעם שה-UFR נפתח, עוברת דרך מד המים כמות של מים בספיקה שהיא מעל סף המדידה של מד המים ולכן הזרימה נמדדת.



**תרשים 8:** UFR סגור: הלחץ במורד הזרם קטן כתוצאה מנזילה



**תרשים 9:** ה-UFR נפתח: הלחץ במורד הזרם שווה לזה שבמעלה הזרם

## מקרי מחקר בינלאומיים

המטרה העיקרית של מחקרים אלה הייתה מענה על השאלות הבאות:

1. האם מד מים יכול למדוד את כל הספיקות?
2. האם UFR יכול להפחית את הזרימה שאינה נמדדת?
3. האם ה-UFR תורם תרומה משמעותית למדידת הזרימה באמצעות מד המים?

בוצעה בדיקה סטטיסטית כדי לברר האם יש זרימה לא מדודה העוברת דרך מד המים בספיקות נמוכות. תהליך הבדיקה היה כדלהלן:

1. ודא שגלאי הנזילות של מד המים קבוע ויציב.
2. סגור את השסתום הראשי, לפני או אחרי מד המים. (אם השסתום ישן או פגום יתכן שהוא לא יאטום, במקרה זה התהליך אינו אמין מספיק כדי לקבוע אם יש או אין זרימה לא מדודה).
3. המתן כ- 60 שניות (במהלך זמן זה המים יתנקזו מהצנרת הביתית, בין אם כנזילה או כזרימה בספיקה נמוכה מאוד, למשל דרך שסתום מצופף לתוך מיכל מים).
4. פתח את השסתום הראשי תוך התבוננות קפדנית בגלאי הנזילות שבמד המים. אם יש נזילה בבית, הנפח, השווה לזה של המים שהתנקזו, יזרום עם מספיק אנרגיה כדי להפעיל את מד המים, וניתן יהיה לראותו בגלאי הנזילות. אם אין כל נזילה, גלאי הנזילות יישאר קבוע.

## שיטה ניסיונית לבדיקות בשטח

כדי לקבוע את תרומת ה-UFR התבצעו הצעדים הבאים:

1. בחירת DMA (metered area district – איזור ניטור עצמאי) הכולל מספר סביר של חיבורי מדי מים עם מקור הזנה יחיד ומד מים ראשי.
2. קביעת אובדן המים הנוכחי ללא UFR על ידי השוואת הקריאה של מד המים הראשי עם סכום מדי המים הביתיים. את הקריאות יש לבצע במרווחי זמן ארוכים מספיק ויש לנסות להקפיד ולבצע את כל הקריאות של מדי המים בו-זמנית או בפרק זמן קצר כדי להקטין את ההפרשים הנובעים מהצריכה הנוספת הנצברת במהלך פרק הזמן שבו מתבצעות המדידות. מערכת AMR המאפשרת קריאה של כל מדי המים באותו זמן היא אפשרות עדיפה בהרבה.
3. התקנת ה-UFR – ומדידה מחדש של ההפרשים בין קריאת מד המים הראשי לבין סכום מדי המים הביתיים.

## מקרה מחקר 1 – ישראל, ירושלים, עין כרם

במרץ 2005, הותקנו 120 יחידות UFR ו-360 יחידות UFR בשני אזורי DMA נפרדים בעין כרם שבירושלים.



מדי המים באזורי DMA אלה הם מסוג מספר זרימות, Qn 2.5 class B (תרשים 10).

**תרשים 10: UFR** מותקן, ירושלים, עין כרם

אחוז תת-המדידה נבדק לפני ואחרי התקנת יחידות ה-UFR ומהווה השוואה בין סכום קריאות מדי המים הביתיים לבין קריאת מד המים הראשי של ה-DMA. טבלה 1 מסכמת את התוצאות של מחקר זה. התרומה הממוצעת של ה-UFR הייתה 8.5%.

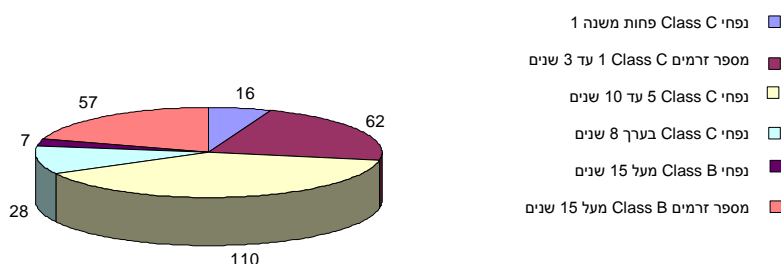
מיקום	סגירה	עם או ללא UFR	משך זמן [חודשים]	תת-מדידה [אחוזים]
DMA ראשון בעין כרם	סגירה	ללא UFR	8	16%
		עם UFR	6	6.1%
		<b>תרומת ה-UFR</b>		<b>9.9%</b>
DMA שני בעין כרם	סגירה	ללא UFR	8	26%
		עם UFR	6	18.8%
		<b>תרומת ה-UFR</b>		<b>7.2%</b>
		<b>תרומה ממוצעת של ה-UFR</b>		<b>8.50%</b>

טבלה 1: תוצאות מחקר עם וללא UFR

## מקרה מחקר 2 – קפריסין, לרנקה

מקרה מחקר זה בוצע בלרנקה, קפריסין בין אוקטובר 2006 לדצמבר 2006. אזור ה-DMA כלל מיגוון משקי בית. בתים פרטיים, בתי דירות ובתים עם מיכלים על הגג. מדי המים ב-DMA זה מוצגים בתרשים 11.

### התפלגות סוגי מדי זרם



**תרשים 11:** התפלגות סוגי מדי המים ב-DMA

התבצעו קריאות שבועיות לפני ואחרי התקנת יחידות ה-UFR. לפי טבלה 2 תרומת ה-UFR הייתה 9.93%.

הפרש	UFR ללא	UFR עם	
	3066.48	3242.84	אזור 1, סך מדי מים של צרכנים (צריכה)
	3667.00	3556.00	אזור 1 (סך מד מים ראשי (ביקוש)
287.36	600.52	313.16	מים שלא נרשמו במ"ק
7.57%	16.38%	8.81%	מים שלא נרשמו כאחוזים מהביקוש הכולל
9.93%	19.58%	9.66%	מים שלא נרשמו כאחוזים מהצריכה הכוללת

טבלה 2: תוצאות בלרנקה עם וללא UFR

### מקרה מחקר 3 - מלטה

מתקן המים הלאומי במלטה זיהה אזור קטן למטרות מחקר ניסיוני. האזור נבחר בהתאם לגילאי מדי המים שבו, וכלל פילוג נורמלי של גילאי מדי מים עם ממוצע גילאים של חמש שנים. אזור Poezija כולל 26 צרכנים ביתיים עם צדי מיים נפחיים בדירוג D ( $Q_n=1 \text{ m}^3/\text{hr}$ ) ומיכלי מים על גגות הבניינים (תרשים 12). יחידות ה-UFR הגדילו את נפח המים שנמדד באחוז משמעותי של 5.5% עד 6% של המים המסופקים לאזור (טבלה 3).



תרשים 12: אזור המחקר (שמאל) שבו הותקנו יחידות UFR (ימין) במלטה

% שיפור כולל	% כולל של תת-מדידה לעומת מד המים הראשי		מספר בדיקה
	UFR עם	UFR ללא	
6	12.1	18.1	1
5.5	21.2	26.7	2
5.8	22.2	28	3

טבלה 3: השפעת יחידות UFR על תת-מדידה של מדי מים

### מסקנות

בבתיים רבים מבין הבתים שנבדקו נמצאו נזילות וזרימות מים אחרות שאינן מדודות בספיקות נמוכות. יחידת ה-UFR הצליחה להפחית את הזרימה שאינה נמדדת ונמצאה כיעילה מאוד בהורדת רמת הפחת. ליחידת ה-UFR הייתה השפעה משמעותית על מדידת הזרימה באמצעות מד המים. ה-UFR הגביר את מדידת המים במד המים ב-5% עד 10%.

- Arregui, F., Cabrera J.E., Cobacho R. (2006), Integrated Water Meter Management, IWA Publishing, London, UK
- Arregui, F., Cabrera J.E., Cobacho R., Garcia-Serra, J. (2005), Key Factors Affecting Water Meter Accuracy, International Water Association Conference Leakage 2005: Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Arregui, F., Cabrera J.E., Cobacho R., Garcia-Serra, J. (2006), Reducing Apparent Losses Caused By Meters Inaccuracies, IWA Publishing, London, UK
- Charalambous B., Experiences in DMA redesign at the Water Board of Lemesos, Cyprus, International Water Association Conference Leakage 2005: Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Davidesko, A. (2007), UFR – an innovative solution for water meter under registration – Case study in Jerusalem, Israel. Bucharest: IWA Conference, Submitted.
- Farley, M.R. (2006), A Review of Water Loss Management Technology Being Developed and Used Internationally, Conference: Skopje, Republic of Macedonia.
- Rizzo, A. (2006), Apparent Water Loss Control: Theory and Application, Conference: Skopje, Republic of Macedonia.
- Rizzo, A., S. John G., (2006), Apparent Water Loss Control: A Case Study Focusing on Reducing On-Site Meter Under-Registration, Conference: Skopje, Republic of Macedonia.
- Rizzo, A., Cilia J., (2005), Quantifying Meter Under-Registration Caused by the Ballvalves of Roof Tanks (for Indirect Plumbing Systems), International Water Association Conference Leakage 2005: Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Rizzo, A. (2002), Strategic Management of Water Leakage in the Maltese Islands, Engineering Today, Issue No. 17.
- Thornton, J., Rizzo, A. (2002), Apparent Losses, How Low Can You Go? International Water Association Conference. Lemesos, Cyprus.