

הלמי מים במערכות צנרת

כתוצאה משחרור אוויר

סריניוסה לינגרדדי*, דון ג'. ווד** ונפתלי זלוצובר***

p_a = לחץ אטמוספרי
 γ = קבוע פוליטרופי המגדיר את תהליך ההתפשטות
 ρ = צפיפות האוויר בשסתום (סלאג לרגל קוב או ק"ג למטר קוב)
 C_D = מקדם ספיקה של הנחיר
 A_0 = שטח זרימה של הנחיר (ברגל מרובע או מ"ר).
 קבוע פוליטרופי של 1.0 משמעותו תהליך של התפשטות איזותרמית; 1.4 משמעותו תהליך איזנטרופי. מקובל להניח $\gamma = 1.2$ כאשר אופי תהליך ההתפשטות אינו ידוע.
 אם לחץ האוויר עולה עד 1.89 פעמים הלחץ האטמוספרי, הזרימה הפוכת לחנוקה (כלומר היא מגיעה למהירות הקול), וספיקת האוויר המסית מוגדר על-ידי:

$$m = C_D A_0 \left[2 \rho \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

משוואה (1) שימשה להפקת הגרפים המוצגים באיור 1. גרפים אלה מציגים את הספיקות הנפחיות התיאורטיות ברגל קוב לשנייה או במטר קוב לשנייה דרך נחיר בקוטר 1 רגל (0.3 מ'), כאשר משתמרים שים בערך של 1.2 עבור הקבוע הפוליטרופי ובמקדם ספיקה $C_D = 1$. הגרפים מציגים את הספיקה הנפחית בפועל, מבוססת על צפיפות האוויר בלחץ הקיים בצינור, ואת הספיקה בתנאים סטנדרטיים (לחץ אטמוספרי). אפשר להשתמש בגרפים אלה לחישוב מהיר של הספיקה דרך נחיר כלשהו על-ידי הכפלת הערך בציר X של איור 1 ב- $C_D d^2$, כאשר d הוא הקוטר בפועל של הנחיר ברגל או מטרים. מקדם הספיקה C_D יכול לנוע בין 0.45 ו-0.75. מומלץ שימוש בערך של 0.62 אם אין נתונים זמינים עבור פרמטר זה.
 למשל, הספיקה היוצאת מנחיר של 2 אינץ' (50 מ"מ) תחת 10 רגל (3 מ') לחץ מים נקבע בדרך הבאה. מאיור 1, הערכים בציר X המתאימים ללחץ של 10 רגל (3 מ') הם 530 רגל לשנייה (161 מטר לשנייה; סטנדרטי) ו-430 רגל לשנייה (131 מטר לשנייה; בפועל). בהנחה ש- $C_D = 0.62$ ו- $d = 0.167$ רגל, ניתן לחשב ספיקות של 9.13 רגל קוב לשנייה (0.26 מטר קוב לשנייה; סטנדרטי) ו-7.75 רגל קוב לשנייה (0.22 מטר קוב לשנייה; בפועל), על-ידי הכפלת ערכי ציר X מאיור 1 ב- $(0.167)(0.62)^2$. אפשר לבצע בדיקה נוספת על-ידי שימוש בטבלה לפליטת אוויר ב-AWWA M-51 (2002), שנותנת קצב פליטה של 10.4 רגל קוב לשנייה (0.34 מטר קוב לשנייה) דרך נחיר של 2 אינץ' (50 מ"מ) בלחץ של 10 רגל (3 מ') עבור $C_D = 0.7$. התאמה ל- $C_D = 0.62$ נותנת זרימה סטנדרטית של 9.21 רגל קוב לשנייה (0.26 מטר קוב לשנייה). ייתכן שהסיבה להבדל הקל נעוצה בשימוש בערך שונה עבור הקבוע הפוליטרופי.

השוואת תיאוריה עם נתוני ביצועים

היצרנים מספקים נתוני ביצועים עבור שסתומי אוויר. איור 2 מציג נתונים מאר.י. אביזרים להולכת נוזלים (2001) עבור נחיר של 2 אינץ'

מקובל להתקין שסתומי אוויר בנקודות גבוהות לאורך צנרת הולכת מים. בחירה לא נכונה של מידות השסתום עשויה להביא להפלטה מהירה של אוויר, וכתוצאה מכך להלמי מים גבוהים מדי בשסתום, בסביבת שסתום האוויר. אמנם מניעת התהוות קוויטציה (וואקום) בנקודות גבוהות דורשת הזרמה מהירה של אוויר לתוך הצנרת, ולכן נחיר כניסה גדול יותר. יחד עם זאת, השימוש באותו נחיר עבור הזרימה היוצאת עשוי לגרום לפליטה מהירה של האוויר. שימוש בשתי מידות נחירים - נחיר כניסה גדול יותר ונחיר יציאה קטן יותר - עשוי למנוע הלמי מים משניים לא רצויים הקשורים בפליטה המהירה של האוויר. מאמר זה מדגים, באמצעות שני יישומים, לדוגמה, את ההשפעה החיובית של נחירי יציאה קטנים יותר על הלמי מים מיידיים אחרי פליטת האוויר. המחקר גם מציג משוואה מפושטת להערכת עוצמת הלמי המים, המבוססת על מאפייני הצינור, מאפייני שסתום האוויר והלחץ בתוך השסתום בדיוק לפני השחרור הסופי של אוויר. שחרור האוויר הסופי דרך שסתומי אוויר יוצר הלם מים. תופעה זו, הנובעת מההאטה המהירה של הנוזל ברגע שהאוויר נפלט במלואו, מכונה "טריקת אוויר". היא יוצרת הלם מים הדומה לזה הנוצר על-ידי האטת הנוזל המהירה הנגרמת על-ידי סגירת מגוף. אם האוויר משוחרר מהר מדי, הלם מים גבוה מדי עשוי להיווצר. חשוב לתכנן את שסתומי שחרור האוויר בצורה שתמנע הלמי מים גבוהים מדי.

ניתוח

הזרימה המסית של אוויר (מצב לא-חנוק) דרך נחיר מוגדרת על-ידי המשוואה הבאה (ווד ופונק, 1996; ווילי וסטריטר, 1978):

$$m = C_D A_0 \left\{ 2 \rho \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{2\gamma} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \right] \right\}^{1/2} \quad (1)$$

כאשר:

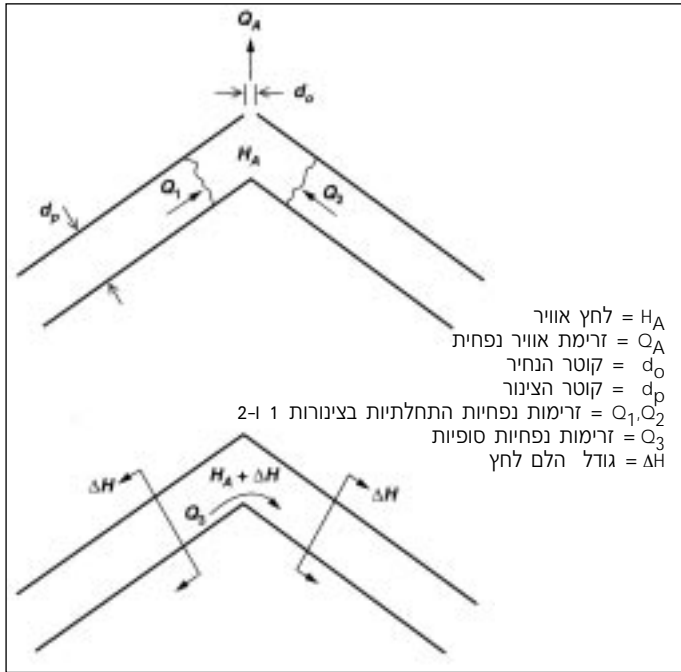
- m = ספיקה מסית (בסלאג לשנייה או ק"ג לשנייה)
- p = לחץ אוויר (מוחלט) בשסתום (פאונד לרגל מרובע או ניוטון למ"ר)

הערת המערכת: המחברים משתמשים במושג "pressure surge" פעמים רבות במאמר זה. מושג זה, שפירושו "התפרצות לחץ" מתאר את התופעה בדיוק רב. בעברית נוהג להשתמש במושג "הלם מים" המתאים למושג "water hammer" באנגלית, גם עבור תופעת ה-"pressure surge". הוחלט להשתמש במושג "הלם מים", מאחר והוא המקובל בארץ, עבור "pressure surge".

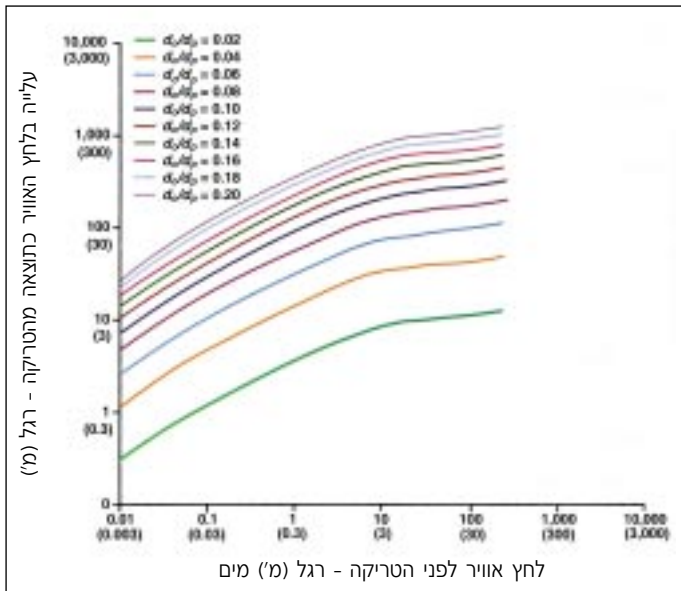
* סריניוסה לינגרדדי הוא פרופסור מהמניין להנדסה אזרחית באוניברסיטה של קנטאקי. הוא מוסמך לטכנולוגיה ובעל תואר דוקטור בהנדסה אזרחית מהמכון ההודי לטכנולוגיה במדרס, הודו, ותואר בוגר בהנדסה אזרחית ממכון מניפאל לטכנולוגיה, הודו.

** דון ג'. ווד הוא פרופסור אמריטוס בהנדסה אזרחית באוניברסיטה של קנטאקי

*** נפתלי זלוצובר מהנדס באר.י. אביזרים להולכת נוזלים, קיבוץ כפר חרוב, ישראל



איור 3. מצב לפני ואחרי "טריקת אוויר"



איור 4. לחצי טריקת אוויר עבור גדלים שונים של נחיר היציאה

$$\Delta H = \frac{C}{gA} (Q_2 + Q_3) \quad (4)$$

כאן:

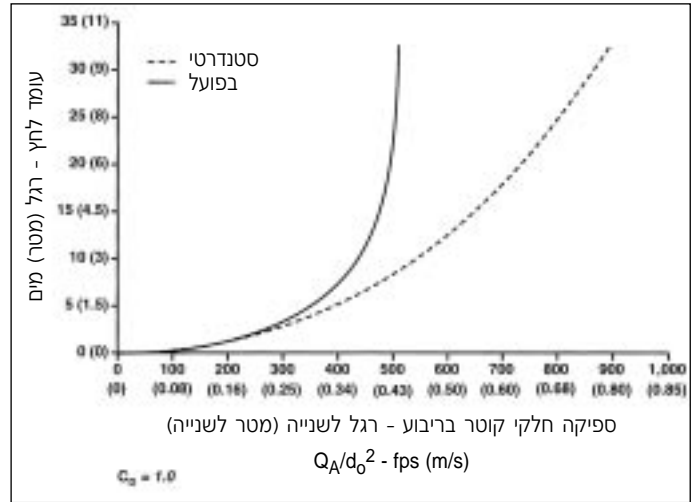
- = g תאוצת כוח הכובד
- = C מהירות הגל בצינורות
- = A שטח חתך הצינורות.

את משוואות (3) ו-(4) אפשר לאחד למשוואה אחת:

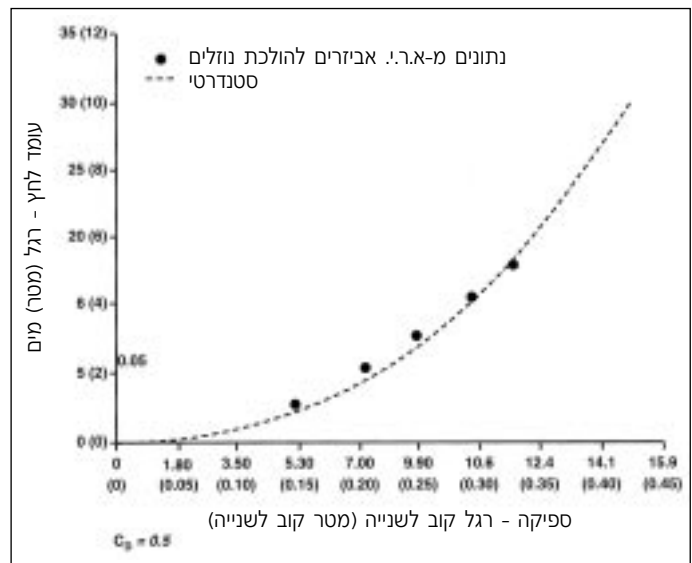
$$\Delta H = \frac{C}{gA} \frac{(Q_1 + Q_2)}{2} \quad (5)$$

בדיוק לפני קריסת כיס האוויר, אפשר להניח ש:

$$Q_A = Q_1 + Q_2$$



איור 1. זרימת אוויר דרך נחיר



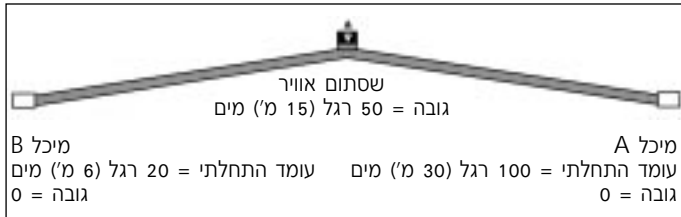
איור 2. השוואת נתוני הביצועים של שסתום אוויר לחיזויים התיאורטיים

50 מ"מ). מוצגת גם העקומה התיאורטית המחושבת באמצעות משוואה (1) עם $C_D = 0.60$. אפשר לראות שההתאמה בין הביצועים התיאורטיים והביצועים בפועל של שסתום אוויר זה טובה מאוד. בתכנונים רבים, ה- C_D הדרוש כדי להסביר את הביצועים בפועל עשוי להיות נמוך בהרבה מ-0.62. ערך זה מתאים למצב אידיאלי של נחיר עגול שהגישה אליו אינה מופרעת. נתוני ביצועים של שסתומי אוויר שונים מראים שתצורת שסתום האוויר עשויה להוריד באופן משמעותי את הערך של C_D . למשל, במקרה של נחיר מלבני יש להשתמש בערך C_D של כ-0.21 כדי לקחת בחשבון את חוסר היעילות של הצורה המלבנית.

הלם מים הנובע מ"טריקת אוויר"

איור 3 מראה את המצב בדיוק לפני ואחרי שכל האוויר נפלט דרך הנחיר ומגדיר את הפרמטרים במשוואות (3) עד (6). לשם פשטות, מניחים שלשני הצינורות המחוברים יש אותן תכונות. כאשר כיס האוויר יר קורס, נוצר הלם מים בעל ערך ΔH (רגל או מטרים). את היחס הבסיסי של הלם מים, המייחס את השינוי בספיקה להלם המים, אפשר לכתוב בצורה הבאה:

$$\Delta H = \frac{C}{gA} (Q_1 - Q_3) \quad (3)$$

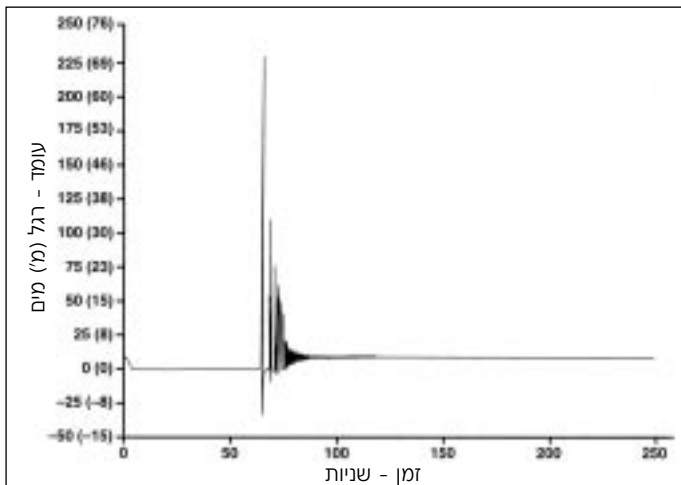


איור 5. מודל זרימת מעבר לחישוב טריקת אוויר

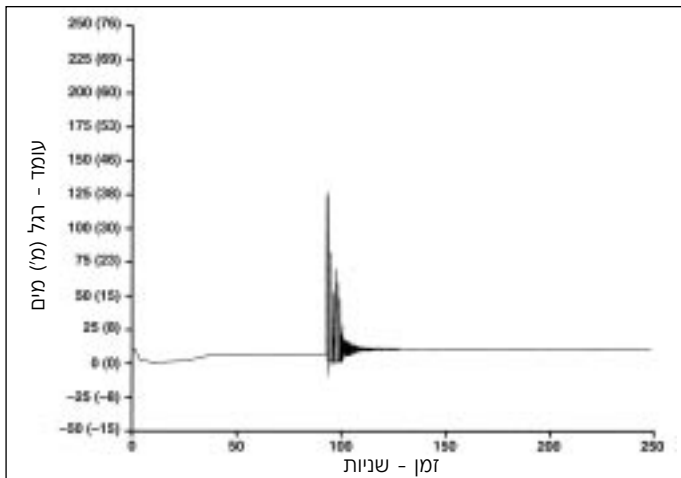
נחיר יציאה. למשל, אם לחץ האוויר בנחיר יציאה של 5 אינץ' (127 מ"מ) בצינור 24 אינץ' (600 מ"מ) בדיוק לפני טריקת אוויר הוא 10 רגל (3 מ') מים, כפי שנקבע על-ידי חקר ניתוח טרנסיאנטים, העלייה בלחץ אחרי טריקת האוויר תהיה כ-900 רגל (274 מ'). אם רצוי להגדיל את לחץ טריקת האוויר לערך נמוך מ-100 רגל (30 מ'), על המתכנן לבחור בגודל נחיר יציאה של כ-1.5 אינץ' (38 מ"מ) ולהעריך את הלימותו.

חישובים לדוגמה

בנה מודל של זרימת מעבר כדי ליצור טריקת אוויר בשסתום אוויר, והשוואה התוצאה לזו של משוואה (10). מודל זרימת המעבר משתמש במשוואה (1) לחישוב הזרימה היוצאת מהנחירים ולוקח בחשבון את דחיסת האוויר הלכוד. איור 5 מציג את סכמת הצנרת המתאימה למודל זה. מורידים את העומד משמאל לשסתום מ-100 רגל (30 מ') ל-20 רגל (6 מ') ב-10 שניות, ואחר כך מעלים אותו



איור 7. ניתוח הלם עבור נחיר 2 אינץ' (50 מ"מ)



איור 8. ניתוח הלם עבור נחיר 1 אינץ' (25 מ"מ)

ואז אפשר לכתוב את משוואה (5) בצורה הבאה:

$$\Delta H = \frac{C}{gA} \frac{Q_A}{2} \quad (6)$$

הנחה זו, המתעלמת מהשפעת הדחיסות על יחס הרציפות, נבדקת בפרק "חישובים לדוגמה" על-ידי השוואת התוצאות עם אלה המתקבלות כאשר השפעת הדחיסות נלקחת בחשבון. באמצעות הנתונים באיור 1 ובמשוואה (6), אפשר לחזות את עוצמת הלם המים של טריקת האוויר אם נתון לחץ האוויר לפני הטריקה:

הספיקה הנפחית של אוויר בפועל Q_A היא:

$$Q_A = Q_p d_o^2 C_D \quad (7)$$

כאשר Q_p הוא הערך מגרפים (איור 1). בהנחה ש- $C_D = 0.62$, אפשר לאחד משוואות (6) ו-(7). ולקבל:

$$\frac{\Delta H}{C/g} = 0.3944 Q_p \left(\frac{d_o}{d_p} \right)^2 \quad (8)$$

התאמת עקומת חזקה לגרף של זרימת אוויר סטנדרטית המוצג באיור 1 נותנת (הלימות: $R^2 = 0.9952$):

$$Q_p = e^{-0.029(\ln H_A)^2 + 0.425(\ln H_A) + 5.206} \quad (9)$$

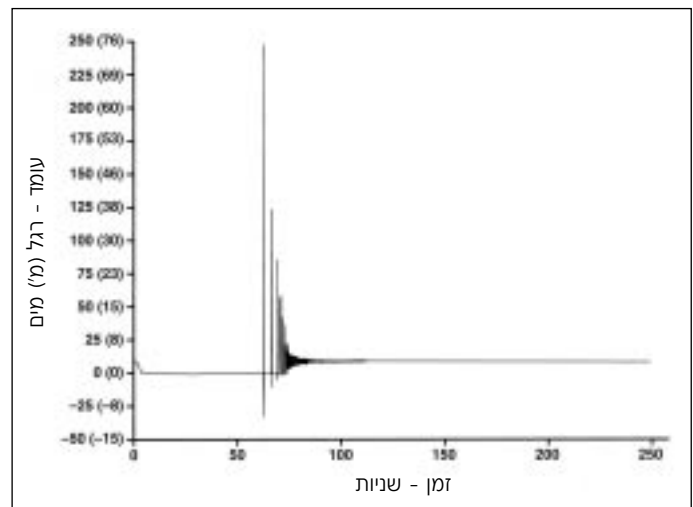
על-ידי איחוד משוואות (8) ו-(9) מקבלים:

$$\frac{\Delta H}{C/g} = 0.3944 \left[e^{-0.029(\ln H_A)^2 + 0.425(\ln H_A) + 5.206} \right] \left(\frac{d_o}{d_p} \right)^2 \quad (10)$$

אפשר להשתמש במשוואה (10) לחישוב עוצמת הלם המים בעקבות פליטת האוויר בתנאים לא-חנקים. משוואה דומה אפשר לקבל עבור זרימת אוויר בתנאים חנקים ($R^2 = 0.992$):

$$\frac{\Delta H}{C/g} = 0.3944 (0.465 H_A + 494) \left(\frac{d_o}{d_p} \right)^2 \quad (11)$$

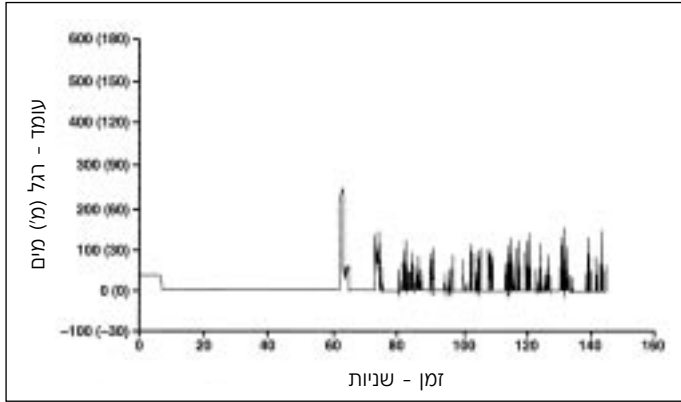
איור 4 מציג עקומות המבוססות על משוואות (10) ו-(11) עבור ערכים שונים של יחס d_o/d_p . איור 5 יחד עם תכנה למידול טרנסיאנטים (מצבי מעבר), יאפשר למהנדסים לחשב במהירות גודל מתאים של



איור 6. ניתוח הלם עבור נחיר 4 אינץ' (100 מ"מ)

טבלה 1. סיכום עליות הלחץ דרך נחירים בגודל שונה אחרי הפלטת האוויר

גודל נחיר אינץ' (מ"מ)	עומד בשסתום אוויר (H _A) רגל מים (psi)	H _A משוואה (10) רגל מים (psi)	ניתוח נחשול H _A רגל מים (psi)
4.0 (100)	0.059 (0.026)	236.4 (102.3)	237.8 (102.9)
2.0 (50)	0.825 (0.358)	228.4 (98.9)	218.1 (94.4)
1.0 (25)	4.690 (2.030)	111.6 (48.3)	120.6 (52.2)
0.5 (12.5)	7.810 (3.380)	33.4 (14.5)	42.3 (18.3)



איור 11. ניתוח הלם עבור דוגמה 2, נחיר 3 אינץ' (75 מ"מ)

גבוהה ב-50 רגל [15 מ'] ממתקן האחסון במפלס הקרקע לאורך פרופיל הצנרת. מצב המעבר (הטרנזיאנט) עבור צנרת זו נוצר על-ידי כיבוי מבוקר במשך 5 שניות (שינוי ליניארי במהירות המשאבה) בנקודת זמן $t=5$ שניות, ואחריו הפעלה במשך 5 שניות של המשאבה. קיים פער-זמן של 30 שניות בין כיבוי המשאבה והפעלתה מחדש. אירועים 11 עד 13 מציגים את תגובת המעבר המתקבלת מניתוח הלם עבור שלושה גדלים של נחירי יציאה: 3 אינץ' (75 מ"מ), 1 אינץ' (25 מ"מ) ו-0.5 אינץ' (12.5 מ"מ). ברור שהשימוש בנחיר של 0.5 אינץ' (12.5 מ"מ) מביא לתגובת מעבר משנית זניחה (בהשוואה לשני הנחיריים האחרים) בגלל טריקת אוויר. עם זאת, הביצועים של נחיר 1 אינץ' (25 מ"מ) עשויים להיות הולמים גם הם, תלוי ביכולת של חומר הצינור לעמוד בלחצי הלם. במקרה המסוים, השימוש בנחיר 1 אינץ' (25 מ"מ) עדיף, כי הוא פולט את האוויר מהר יותר מנחיר 0.5 אינץ' (12.5 מ"מ).

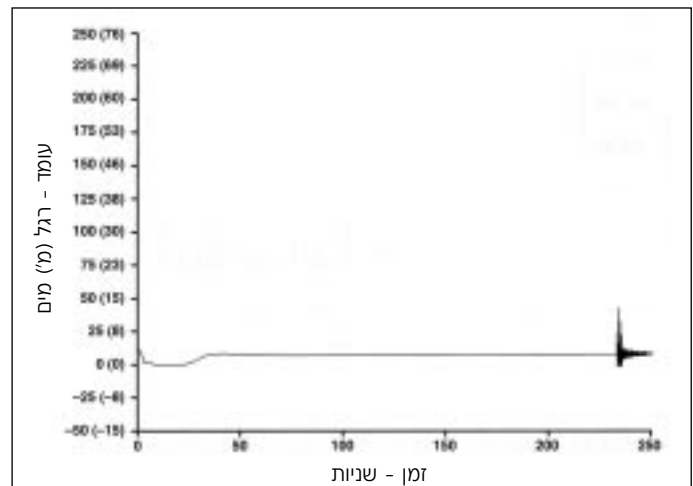
סיכום ומסקנות

שסתומי אוויר הם חלק בלתי נפרד של קווי צנרת ארוכים העוברים על פני קרקע גליים. אמנם נחירי כניסה גדולים מקלים על מצבי קוויטציה במהלך אירועי מעבר, אך נחירי יציאה באותו גודל לפעמים גורמים להלמי מים מזיקים אחרי השחרור הסופי של אוויר. מאמר זה

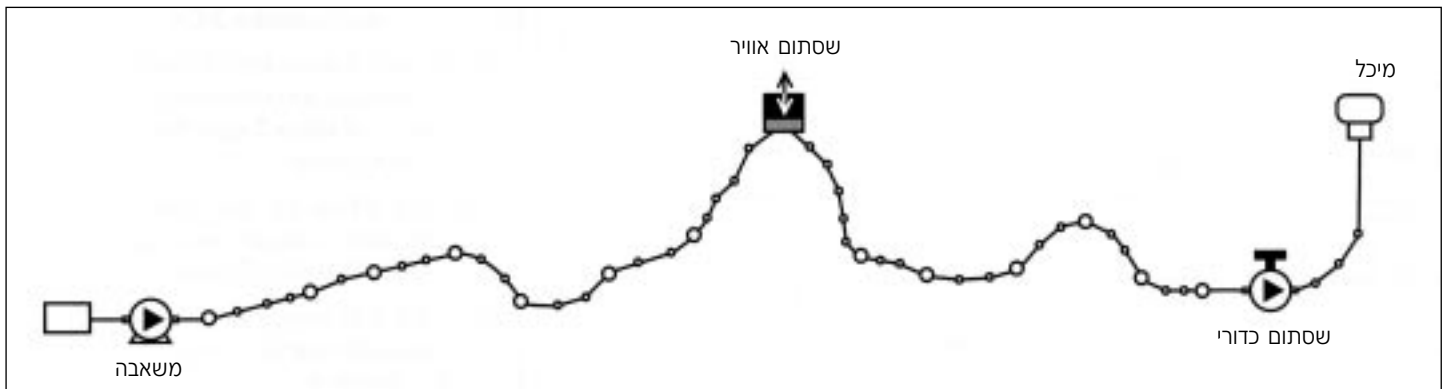
חזרה ל-100 רגל (30 מ') ב-10 השניות הבאות. בוצע ניתוח עבור שסתום אוויר עם נחיר כניסה של 4 אינץ' (100 מ"מ) ונחיר יציאה המשתנה מ-4 אינץ' (100 מ"מ) עד 0.5 אינץ' (12.5 מ"מ). שסתום האוויר נפתח להכנסת אוויר כאשר העומד יורד מתחת ללחץ האטמוספרי, ואחר כך פולט את האוויר כשהעומד עולה. בכל מקרה, העומד מגיע לערך קבוע ושומר עליו במשך זמן משמעותי לפני התרחשות "טריקת אוויר".

טבלה 1 מסכמת את השינויים בלחץ כאשר כל האוויר נפלט דרך נחירים בגודל שונה, ואילו אירועים 6 עד 9 מראים את תגובות המעבר (הטרנזיאנט) שנחזו מניתוח הלם לכל אחד מארבעת המקרים. לגבי ניתוח ההלם, דחיסות האוויר בתוך שסתום האוויר נלקחת במלואה בחשבון. השוואה מפורטת בין התוצאות מראה שהנחת הרציפות ששימשה לקבלת משוואה (10) מוצדקת.

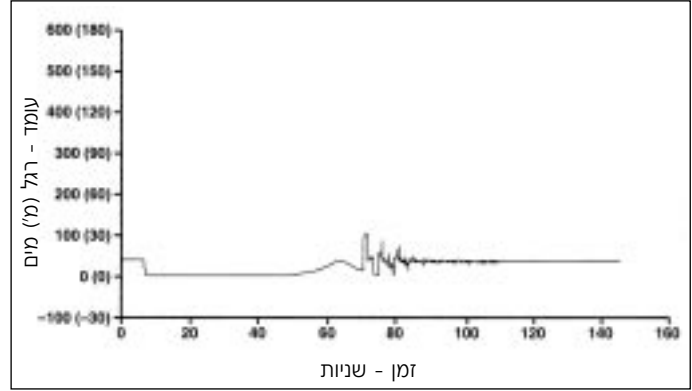
תוצאות דומות תועדו בצנרת מים מורכבת יותר. הסכמה של צנרת זו מוצגת באיור 10. הצנרת כוללת יותר מ-8,000 רגל (2,438 מ') צינור 12 אינץ' (305 מ"מ) עם משאבה של 165 כוח סוס (123 קילו-וואט) השואבת ממתקן אחסון במפלס הקרקע אל מיכל אחסון מוגן בה. שסתום אוויר 3 אינץ' (75 מ"מ) ממוקם בנקודת הגבוהה ביותר



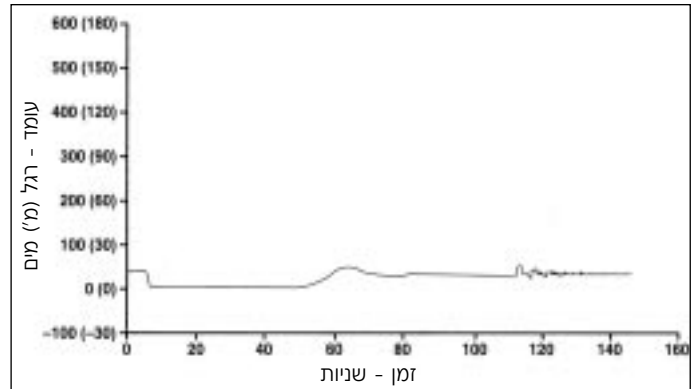
איור 9. ניתוח הלם עבור נחיר 0.5 אינץ' (12.5 מ"מ)



איור 10. סכמה של הצנרת של דוגמה 2



איור 12. ניתוח הלם עבור דוגמה 2, נחיר של 1 אינץ' (25 מ"מ)



איור 13. ניתוח הלם עבור דוגמה 2, נחיר של 0.5 אינץ' (12.5 מ"מ)

מראה, באמצעות שני יישומים לדוגמה, את ההשפעה של גודל נחיר היציאה על לחצי ההלם הנגרמים על-ידי השחרור הסופי של האוויר. שתי הדוגמאות מראות שנחיר יציאה קטן מנחיר הכניסה רצוי להקלה של הלמי מים משניים מוגזמים הנגרמים על-ידי השחרור הסופי של אוויר. באחד היישומים, נחיר יציאה של 0.5 אינץ' (12.5 מ"מ) הביא ללחץ טריקת-אוויר של פחות מ-100 רגל (30 מ') מים, בהשוואה ללחץ מ"טריקת אוויר" של כמעט 550 רגל (168 מ') במקרה של נחיר 3 אינץ' (75 מ"מ). המאמר גם מציג משוואה מפורטת להערכת הלם מים, המבוססת על עומד הלחץ לפני השחרור הסופי של אוויר ועל מאפיינים ידועים אחרים של הצינור והשסתום.

משוואה זו מתעלמת מהדחיסה של האוויר הלכוד בתוך שסתום האוויר, אך החיזויים של המשוואה המפורטת דומים בצורה משביעת רצון לתוצאות המתקבלות מתוכנת ניתוח מצבי מעבר הלוקחת בחשבון את השפעות הדחיסה.

מראי מקום ניתן להשיג במערכת