

איפיוני זרימה של שסתומים חד-כיווניים והפסדי אנרגיה בצנרת

פרופ' מ. תרשיש

הקדמה

שסתומים חד-כיווניים מהווים מרכיב משמעותי באבזורים רבים מספור, המופעלים באספקת מים ובמערכות הידראוליות אחרות.¹ הפעלת השסתומים האלה נועדה למנוע זרימה הפוכה בתנאים משתנים. הדבר דרוש, לדוגמא, כדי למנוע התרוקנות צנרת לאחר הפסקת פעולת משאבה ועבודת משאבה כטורבינה במהירות סיבוב גבוהה בשיעור בלתי נסבל עקב זרימה הפוכה.² כן יכולה ההפעלה של שסתומים חד-כיווניים להתקשר לתופעות של הלם מים, לדוגמא, השסתומים בספיקת המשאבה נותנים סגירה איטית לאחר הפסקת פעילות המשאבה בדרך הרגילה או לאחר הפסקת אספקת אנרגיה, השסתומים בקווי מעקף של משאבות וכדומה.³

אחת הדרישות מפעולת שסתומים חד-כיווניים בצנרות ראשיות היא התנגדות הידראולית נמוכה במצב הפתוח. דרישה זו משמעותית ביותר לחיסכון באנרגיה, בהתחשב במספר העצום של שסתומים חד-כיווניים במערכות צנרת (עשרות אלי שסתומים מופעלים בקווי אספקת המים בישראל). הבחירה בשסתומים חד-כיווניים במהלך תכנון פרויקט הצנרת חייב להתבסס על ניתוח האופייניים השונים של השסתום, לרבות הפסדי אנרגיה. במאמר זה מתוארים דרך הניתוח של הפסדי אנרגיה וניתנות דוגמאות.

הסוגים הראשיים של שסתומים

הפסדי אנרגיה בצנרת, הקשורים להתנגדות הידראולית של שסתומים חד-כיווניים, תלויים בסוג השסתום, בתפן שלו ובכוונונו. התפן הפשוט והנפוץ ביותר של שסתומים חד-כיווניים מבוסס על ניצול פעולת הזרם על השסתום בלא להפעיל מקור אנרגיה חיצוני (ציור 1). לוח הסגירה/פתיחה של מעבר המים כפוף לפעולת כוחות לחץ וחיכוך מזרימת הנוזל, והמומנט של כוחות אלה נתון בתנאי זרימה יציבה, המאוזנת עם המומנט של כוחות משקולת נגדית וחיכוך במסב. שסתומים חד-כיווניים מטיפוס סבסוב אופקי (swing) ושסתומים עם דסקיות הטיה אנכית (tilt) (ציור 1-2), אם מופעלות המשקולות הנגדיות, מהווים שסתומי בקרת פעילות ישירה.^{1,2,5} תפן השסתום החד-כיווני, שבו משמש קפיץ לסגירת השסתום כחלופה למשקולת, שייך גם הוא לסוג שסתומים זה.⁵

הפתיחה של שסתום בקרת פעילות ישירה וההפסדים ההידראוליים בזרימה קבועה תלויים במומנט ניתן לכוונון של המשקולת הנגדית. שינוי מומנט המשקולת הנגדית משפיע אן על ההתנגדות ההידראולית במצב הפתוח והן על התכונות הדינמיות (לדוגמא, זמן הסגירה). בשסתומי בקרה ישירה אפשר להשתמש בצילינדרים הידראוליים כהתקני שיכוך למניעת טריקה ולהקטנת עומסי לחץ הלם מים.⁵ הצורך בכוחות של משקולות או של קפיצים כדי לספק את מומנט הסגירה במצב הפתוח של השסתום לאחר הפסקת זרימת הנוזל (או היחלשותה), מגביל את אפשרויות הקטנת ההתנגדות ההידראולית של שסתומים אלה.

באותם תנאים, יכולים שסתומים חד-כיווניים בעלי בקרה פוזיטיבית להקטין את הוצאות האנרגיה מהסיבות הבאות:

- פתיחה מלאה של השסתום יכולה להתרחש בלא להעביר במצב פתוח את פעולת זרם המים על השסתום במומנט השווה למומנט של המשקולת הנגדית (אשר חייב להספיק לסגירת השסתום במקרה של הפסקות בזרימה). סיבה זו מאפשרת תיכון השסתום עם הפסדים הידראוליים קטנים יותר במצב של פתיחה מלאה.
- ניתן להגיע לפתיחה מלאה של השסתום בכל המקטעים של קצב זרם עבודה (פתיחת השסתום המווסתת על ידי הזרימה נעשית קטנה יותר בקצבי זרימה קטנים יותר, המגדילים את ההפסדים ההידראוליים).

שסתומים הפועלים תחת בקרה חיצונית מספקים אפשרויות טובות יותר לבקרת זרימה ולהפסדים הידראוליים קטנים יותר, אולם שסתומים אלה מורכבים ויקרים יותר. חלק הארי של שסתומים חד-כיווניים, המותקנים כיום בצנרות אספקת מים, הם שסתומי בקרת פעולה ישירה.

עומד הידראולי והפסדי אנרגיה בשסתומים חד-כיווניים פתוחים

צנרת יכולה לפעול שקצבי זרימה שונים Q בפרקי זמן $Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$. שינויים בקצב הזרימה עשויים לנבוע, לדוגמא, משינויים יממיים באספקת המים ושינויים מקבילים במספר המשאבות הפועלות. בנסיבות אלה ישנה השתנות החד-כיווני בעל בקרת פעולה ישירה את מצב הדסקית (מדף) שלו ויגדיל את מקדם ההתנגדות ההידראולי במפתחים קטנים יותר. הגדלה זו אינה דרושה במצב המתואר, וגורמת להפסדי אנרגיה נוספים. אפשר להשתמש במשוואה הבאה לחישוב הכוח המקביל להפסד העומד ההידראולי h (לשסתום חד-כיווני פתוח):

$$N = g\rho hQ \quad (1)$$

כאשר:

g תאוצת כבידה
 ρ צפיפות הנוזל

הפונקציה $h(Q)$ דרושה לחישוב הכוח ונקבעת בדרך כלל על ידי יצרן השסתום החד-כיווני. דוגמא לפונקציה זו מוצגת בציור 4.

את הפסדי האנרגיה E_T בזמן T אפשר לקבוע אם ידועים השינויים היממיים בקצב הזרימה, $Q(t)$:

$$E_T = g\rho \int_T hQ dt \quad (2)$$

בציור 5 מוצגת דוגמא של שינויים יממיים בצריכת מים ושינויים בספיקת תחנת שאיבה לאספקת מים עירונית⁴. ההפרשים בין אספקת המים והצריכה במהלך 24 שעות מקווצים על ידי מאגרי מים.

אם ידועים מחירי האנרגיה, אפשר לחשב את ההוצאות הקשורות בהפעלת שסתומים חד-כיווניים. מחיר יחידת אנרגיה C יכול להיות תלוי בעונה ולהשתנות במהלך שעות היממה (24 שעות), ויכול להשתנות לפי ימי עבודה (ראו טבלה 1) וימי שבתון.

המשוואות הבאות יכולות לשמש לחישוב ההוצאה השנתית לאנרגיה, הקשורה לפעולת שסתומים חד-כיווניים בצנרת:

$$C_{T_y} = g\rho \int_{T_y} chQ dt \quad (3)$$

או

$$C_{T_y} = g\rho \left[\int_{T_{wd}} chQ dt + \int_{T_{hd}} chQ dt \right] \quad (4)$$

כאשר:

C_{T_y} הוצאות שנתיות;
 T_y סיכום זמן העבודה במהלך השנה;
 T_{wd} חלק של T_y המתייחס לימי עבודה;
 T_{hd} חלק של T_y המתייחס לשבתונים ($T_y = T_{wd} + T_{hd}$).

ייתכן שיהיה צורך לקבוע את סכום ההוצאות C_{Ty} המתייחס להפעלת מספר שסתומים חד-כיווניים בצנרת. במקרה זה:

$$C_{Ty} = g\rho \left[\int_{T_{wd}} c \left(\sum_{i=1}^{n_{ch}} h_i Q_i \right) dt + \int_{T_{wd}} c \left(\sum_{i=1}^{n_{ch}} h_i Q_i \right) dt \right] \quad (5)$$

כאשר:

n_{ch} מספר השסתומים החד-כיווניים המותקנים בצנרת.

את הזמנים T_{wd} ו- T_{hd} ניתן לחלק למספר מקטעים, שבהם התפוקה chQ קבועה ואת האינטגרלים במשוואה (5) אפשר לחשב כסכומים. המקרה הפשוט, השסתומים החד-כיווניים המותקנים בצנרת אחת אינם שונים זה מזה. במקרה זה אפשר לבטא כלהלן את סכום ההוצאות, תוך התחשבות במחירי אנרגיה שונים בתקופות שונות (טבלה 1):

$$C_{Ty} = g\rho n_{ch} \sum_{k=1}^{n_{se}} y_k \quad (6)$$

כאשר:

n_{se} מספר התקופות

לתקופה מספר k :

$$y_k = n_{wk} \sum_{j=1}^{n_{wk}} c_{kj} h_{kj} Q_{kj} \Delta t_{kj} + n_{hk} \sum_{j=1}^{n_{hk}} c_{kj} h_{kj} Q_{kj} \Delta t_{kj} \quad (7)$$

כאשר:

n_{wk} מספר ימי עבודה

n_{hk} מספר שבתונים

n_{iwk} מספר מקטעי הזמן Δt_{kj} במהלך יממת עבודה (24 שעות) כאשר $c_{kj} h_{kj} Q_{kj}$ קבוע

n_{ihk} מספר מקטעי הזמן Δt_{kj} במהלך שבתון (24 שעות) כאשר $c_{kj} h_{kj} Q_{kj}$ קבוע

מותר להניח כי $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, ולהשתמש ביחידות הבאות: $C[\text{NIS/kwh}]$, $h[\text{mH}_2\text{O}]$, $\Delta t[\text{h}]$.

כעת אפשר להציג את משוואה (6) בצורה הבאה:

$$C_{Ty} = 0.00272 n_{ch} \sum_{k=1}^{n_{se}} y_k \quad (8)$$

את הפסדי האנרגיה במהלך ימי עבודה (n_w) של שנה אחת אפשר לחשב בעזרת המשוואה הבאה:

$$E_{T_{wy}} = 0.00272 n_w n_{ch} \sum_{j=1}^{n_{iw}} h_j Q_j \Delta t_j \quad (9)$$

כאשר n_{iw} - מספר מקטעי הזמן Δt_j במהלך יממת עבודה (24 שעות), אשר בה $h_j Q_j$ קבוע והמידות

$$h_j[\text{m}], Q_j[\text{m}^3/\text{h}], \Delta t_j [\text{h}] \text{ \& } \sum_{j=1}^{n_{iw}} \Delta t_j = 24\text{h}$$

הפסדים אלה במהלך שבתונים (n_h) יהיו:

$$E_{T_{hy}} = 0.00272 n_h n_{ch} \sum_{j=1}^{n_{ih}} h_j Q_j \Delta t_j \quad (10)$$

כעת אפשר לחשב את ההפסדים וההוצאות בפועל של אנרגיה, אם יהיו ידועים הנצילות של המשאבה, מנוע ההינע והתמסורת ($\eta_p, \eta_{de}, \eta_{tr}$). להלן ההוצאות בפועל על אנרגיה במקרה שבו מותר להניח כי מקדמי הנצילות קבועים:

$$C_{Ty}^{(a)} = C_{Ty} / (\eta_p \eta_{de} \eta_{tr}) \quad (11)$$

כאשר C_{Ty} נקבע על ידי משוואה (6).

דוגמא לחישוב הוצאות אנרגיה

בצנרת $d = 500 \text{ mm}$ ($20''$) מותקנים חמישה שסתומים חד-כיווניים ($n_{ch} = 5$) עם דסקית נוטה אנכית. צריך לחשב את ההוצאות לאנרגיה למקרים שבהם השסתומים מבוקרים על ידי פעולת הזרימה ולמקרים שבהם השסתומים מבוקרים חיצונית.

הנתונים ההתחלתיים לחישובי הוצאות האנרגיה במהלך ימי עבודה (חלק הארי של ההוצאות) הם כדלקמן:

שעות 24-19	שעות 19-6	שעות 6-0	קצב הזרימה משתנה במהלך 24 שעות לפי ציור 4. מקטעי זמן: קצב זרימה בשעה:
2%	6%	2%	ב-% מאספקת יממה (24 ש')
360	1080	360	ב- m^3/h

מחירי אנרגיה במתח גבוה לצרכנים בימי עבודה, לפי טבלה 1.

קצב זרימה, m^3/h	תלות של הפסדים הידראוליים בקצב הזרימה:
360	1080
0.24	0.6
מ'	הפסד הידראוליי, מ'

נצילות המשאבה, מנוע ההינע והתמסורת (מכפלה): $\eta_p \eta_{de} \eta_{tr} = 0.8$.

לצורך חישובי הסכומים במשוואה (7) נוח להציג את נתוני הטבלה עם מקטעי הזמן כאשר $chQ =$ קבוע (טבלה 2).

חישובי ההוצאות בפועל לאנרגיה במהלך כל ימי העבודה בשנה אחת, באמצעות משוואות 7, 8 ו-11, נותנים $E = 32638 \text{ kwh}$ ש"ח. חישוב הפסדי האנרגיה בפרק הזמן המקביל נעשה באמצעות משוואה 9 ונותן $E^{(a)} = 40797 \text{ kwh}$. המדובר כאן במקרה של שסתומים חד-כיווניים מבוקרי זרימה, בלא מקור אנרגיה חיצוני.

את ההוצאות לאנרגיה במקרה של הפעלת שסתום מבוקר פוזיטיבית אפשר לחשב על סמך אותם נתונים ראשוניים, עם שינוי מתאים של ההפסדים ההידראוליים.

אפשר להניח לגבי דוגמא זו הפסד עומד של $h = 0.0124 \text{ m H}_2\text{O}$ בקצב זרימה $Q = 360 \text{ m}^3/h$, והפסד עומד של $h = 0.01116 \text{ m H}_2\text{O}$ בקצב זרימה $Q = 1080 \text{ m}^3/h$.

חישובי ההוצאות לאנרגיה במהלך כל ימי העבודה בשנה אחת נותנים במקרה זה 2305 ש"ח, כלומר, 17.8% מההוצאות במקרה הראשון (הפעלת שסתומי בקרת זרימה ישירה).

התוצאות המתקבלות מוכיחות כי במקרה זה, לצד יתרונות אחרים (הקטנת עומסי הלם מים וכו'), תורמת הפעלת

מקורות

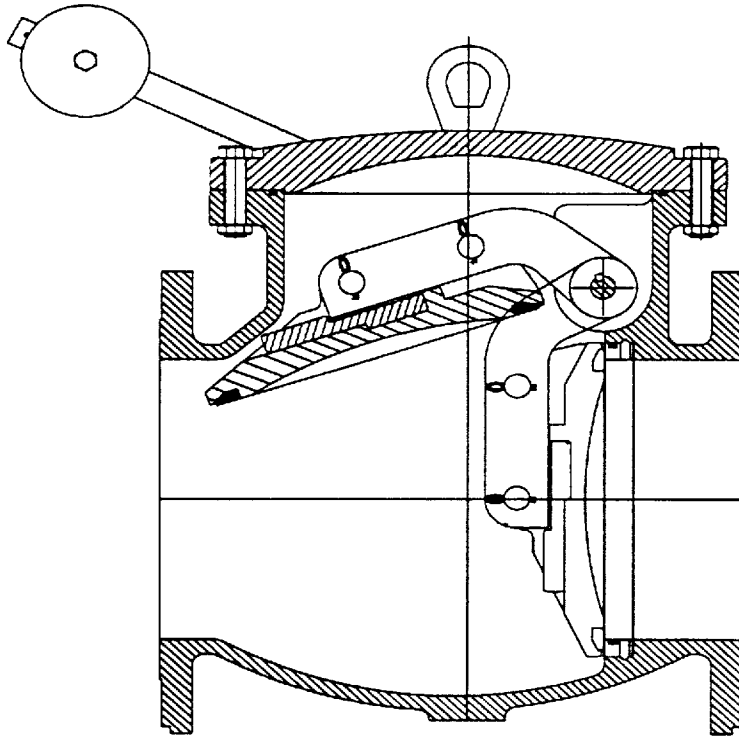
1. Dvir Y. (1997) Flow Control Devices, Israel, 101-132.
2. Marcus N. (1966) Dynamics of controlled check valves for control of flap shock and waterhammer. *International Water and Irrigation Review*, **16**, (3), 31-34.
3. Thorley A.R.D. and Enever K.J. (1979) Control and suppression of pressure surges in pipelines and tunnels, England *CIRIA Report 84*, **19**, 25-27.
4. Kalizun V.I. (1973) *Osnovi vodosnabjenia i kanalisazii* (Principles of Water Supply and Sewage), Moscow, 1-20.
5. Anon (1988) Water Supply Accessories. A.R.I. Kibbutz Kfar Haruv, Israel, 2-26.

טבלה 1. מחירי אנרגיה חשמלית במתח גבוה לצרכנים בימי עבודה (2000)

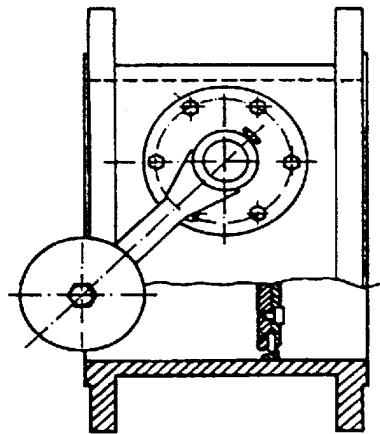
11, 10, 05, 04, 03	02, 01, 12	09, 08, 07, 06	חודשים	פאזה
21:00-17:00	21:00-17:00	16:00-08:00	שעה h	"Pick"
0.3823	0.6557	0.468	המחיר ש"ח/קוט"ש	
17:00-07:00	17:00-07:00	21:00-16:00	שעה h	"Brow"
0.2898	0.2857	0.3088	המחיר ש"ח/קוט"ש	
21:00-07:00	21:00-07:00	21:00-08:00	שעה h	"Wold"
0.1360	0.1469	0.1442	המחיר ש"ח/קוט"ש	

טבלה 2. נתונים לחישוב הוצאות אנרגיה

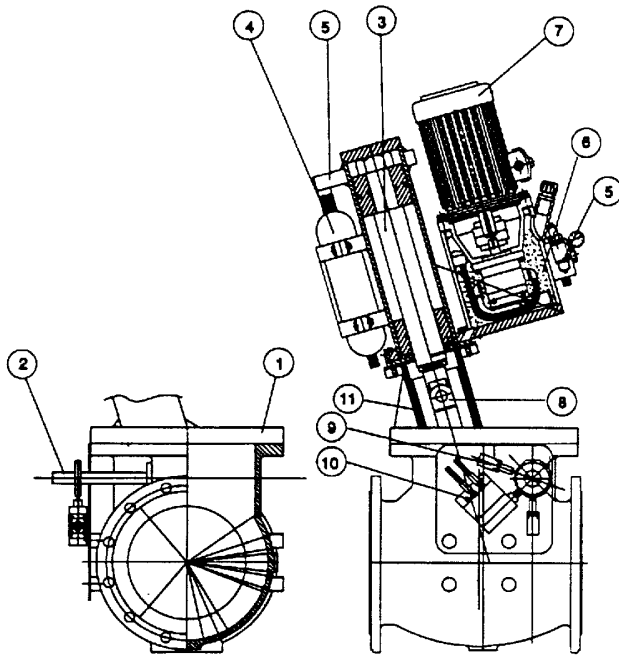
n _{w1} = 86 ; מספר ימי העבודה : 09, 08, 07, 06 ; החודשים :						
24-19		19-6			6-0	מקטעי זמן, h
24-21	21-19	19-16	16-8	8-6	0.1442	המחיר ש"ח/קוט"ש
0.1442	0.3088	0.3088	0.468	0.1442	0.1442	קצב זרימה m ³ /h
360	360	1080	1080	1080	360	הפסד הידראולי mH ₂ O
0.24	0.24	0.6	0.6	0.6	0.24	
n _{w2} = 63 ; מספר ימי העבודה : 02, 01, 12 ; החודשים :						
24-19		19-6			6-0	מקטעי זמן, h
24-21	21-19	19-17	17-7	7-6	0.1469	המחיר ש"ח/קוט"ש
0.1469	0.6557	0.6557	0.2857	0.1469	0.1469	קצב זרימה m ³ /h
360	360	1080	1080	1080	360	הפסד הידראולי mH ₂ O
0.24	0.24	0.6	0.6	0.6	0.24	
n _{w3} = 107 ; מספר ימי העבודה : 11, 10, 05, 04, 03 ; החודשים :						
24-19		19-6			6-0	מקטעי זמן, h
24-21	21-19	19-17	17-7	7-6	0.1360	המחיר ש"ח/קוט"ש
0.1360	0.3823	0.3823	0.2898	0.1360	0.1360	קצב זרימה m ³ /h
360	360	1080	1080	1080	360	הפסד הידראולי mH ₂ O
0.24	0.24	0.6	0.6	0.6	0.24	



ציור 1. שסתום חד-כיווני מטיפוס סבסוב אופקי עם משקולת איזון (א.ר.י. ישראל)



ציור 2. שסתום חד-כיווני עם דיסקית נוטה אנכית ומשקולת איזון (א.ר.י. ישראל)



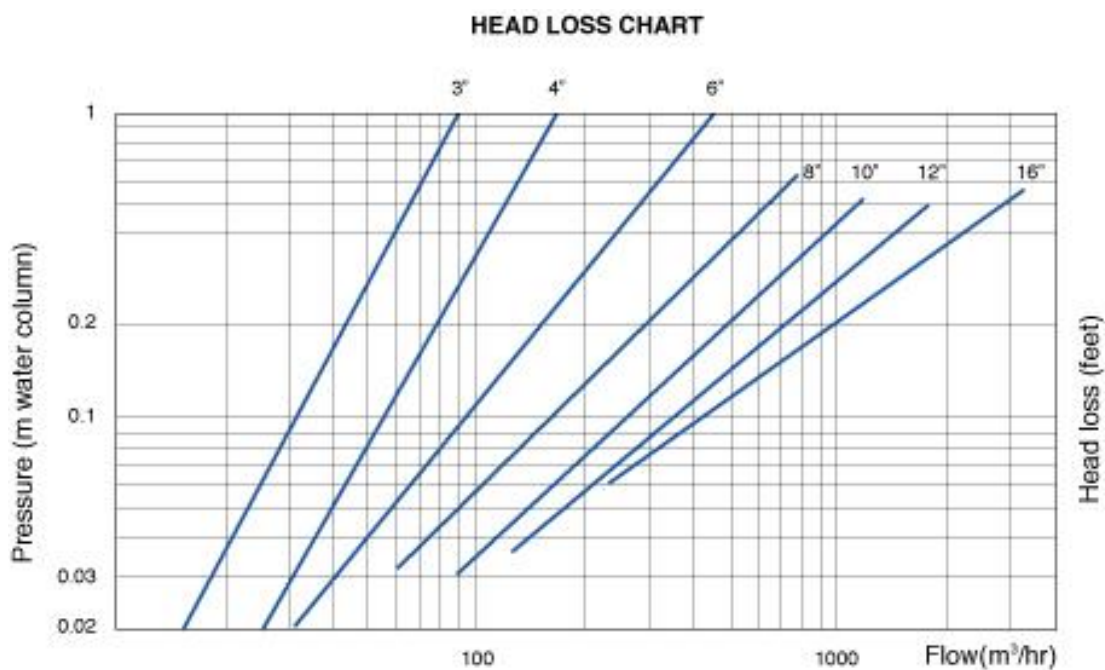
No.	Part
1.	Body
2.	Shaft
3.	Hydraulic Piston
4.	Acumulator
5.	Logic Block
6.	Oil Tank
7.	Electric Motor
8.	Hydraulic System Support
9.	Limit Switch
10.	Hydraulic Valve
11.	Actuator Lever

ציור 3. שסתום חד-כיווני עם מקור אנרגיה חיצוני (א.ר.י. ישראל)

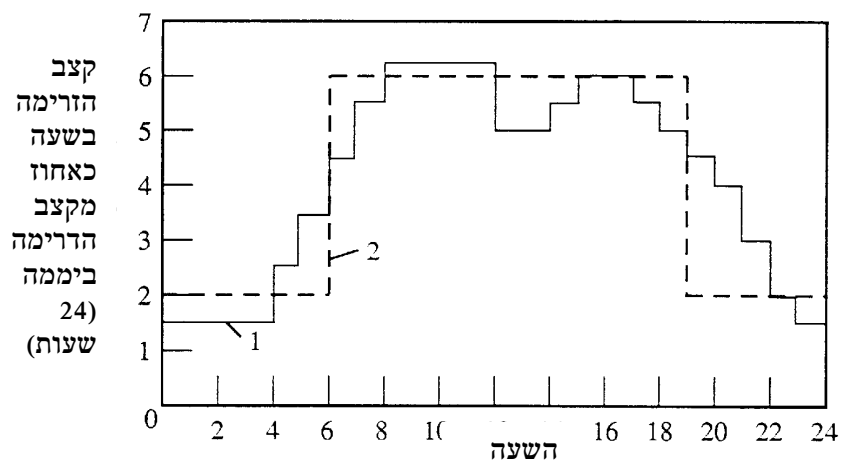
מקרא:

1. גוף
2. גל
3. בוכנה הידראולית
4. מצבר
5. בלוק לוגי
6. מכל דלק
7. מנוע חשמלי
8. תמך מערכת הידראולית
9. מפסק גבול
10. שסתום הידראולי

ציור 4.
לוח
הפסד



נומד של שסתומים חד-כיווניים מטיפוס סבסוב אופקי



1. צריכה עירונית; 2. ספיקת תחנת שאיבה