

מאת אינג' א. קלי

## ה ק ד מ ה

המכשיר לחישוב רשתות, עשוי ליצע פעולות חישוב רבות של מהנדס המים - החל מחישוב הפסד עומד בצנור בודד וכלה בחישוב טבעת המכילה צנורות רבים המוליכים ספיקות שונות.

בחישוב העומד בצנור בודד, מבטל המכשיר את הצורך למצוא תחילה את הפסד העומד היחסי ולהכפילו אח"כ באורך הצנור: שתי פעולות אלה מצטמצמות, ע"י המכשיר, לאחת.

ישנן בעיות הקשורות במספר רב של צנורות, למשל: חישוב "עקום התנגדות" (עקום השתנות הפסד העומד על פי השתנות הספיקה) של קו המספק או קולט ספיקות בדרכו. בבעיה מסוג זה, יש לראות כל קטע שבין 2 נקודות של הספקה או קליטה - בצנור בפרד - ולחשב אותו בנפרד; אך בעזרת מכשיר זה ניתן לראות את כל הסרייה כיחידה אחת וניתן לקרוא את הפסדי העומד בכל אחד מהקטעים מבלי לחשבם בנפרד; ויותר מזה: כאשר יש לחזור על החישוב לגבי ספיקות שונות אחרות (פעולה אופיינית בחישוב עקום התנגדות של קו מים) - מצטמצמת פעולה זאת להזנת לוח וקריאה מחודשת של התוצאות ללא כל חישובים.

בבעיות מסוימות, מופיעות 2 ויותר סריות של צנורות אשר אין לדעת מראש איך תתחלק ביניהן הספיקה הנכנסת למערכת; בעיה זאת היא בעיה ה"טבעת" ופתרונה מיגע במיוחד משום שהוא מבוסס על תהליך של צנור ותקון. בבעיות מסוג זה, יעילותו של מכשיר חישוב זה בולטת יותר כפי שיוסבר להלן.

### 1. המכשיר וחלקיו

המכשיר מסתמך על נוסחת Hazen-Williams בקביעת הפסד העומד בכל

צנור:

$$H = 1.131 \times 10^{-15} \times (Q/C)^{1.852} \times D^{-4.87} \times L \quad * (1)$$

$h$  : הפסד העומד במטרים,  $Q$  : הספיקה במ"ק/ש',  $D$  : קוטר הצנור במ"מ,  
 $L$  : אורך הצנור במטרים,  $C$  : קופיציאנט החכוך של הצנור.

המכשיר מורכב ממסגרת, סרטים ולוח-נע. הלוח הנע עשוי לנוע בתוך המסגרת

בכוון אורכי. הסרטים הנם רצועות אין-סופיות המקיפות את המסגרת לרחבה; הן עשויות לנוע על המסגרת בכוון אורכי - ע"י החלקה לאורך המסגרת ובכוון רחבי - ע"י סבוב בכוון בו הן מקיפות את המסגרת. על הסרטים מסומנות 2 סקלות: סקלה של הפסדי עומד במטרים (לאורך השפה השמאלית של כל סרט) וסקלה של קטרים (לאורך השפה הימנית של הסרט) קטרים של פלדה מסומנים באדום, של אסבסט כחול. כל הסרטים זהים ביניהם.

על הלוח הנע נתונה סקלה רוחבית של אורכי הצנורות (במטרים); סמני סקלה זאת נמשכים לכל אורך הלוח הנע. כ"כ נתונה על הלוח הנע סקלה אורכית של ספיקות (במ"ק/ש') ועקום; סקלת הספיקות והעקום הנם סימטריים לגבי קו אנכי העובר במרכז הלוח הנע; קו זה מציין ספיקת 0 וממנו נמשכת סקלת הספיקות לשני הכוונים עד ל-400 מ"ק/ש' לכל כוון. נוסף על אלה נמצאת על הלוח הנע מימין סקלה רוחבית קטנה של ערכי  $C$ .  $C$  לצנורות פלדה: 90. לצנורות אסבסט או בטון: 135

(\* - נוסחת H.W. בצורתה המטרית ע"פ: טבלאות הידרוליות מאת פרופ' מ.ש. אירמאי הוצאת הטכניון 1952.



## 2. אופן חישוב "עקום התנגדות" של קו המספק בדרכו

נתון קו בהתאם לציור 1. קו זה מרכב מ-4 צנורות אזבסט לפי הפרוט הבא:  
12" באורך 1000 מ', 8" באורך 500 מ', 6" באורך 100 מ', 4" באורך 100 מ'. משאבה  
A סונקת מים לקו ובסופו נמצאת ברכה B. הקו מספק את הספיקות 100, 150, 50  
מ"ק/ש' כנתון בציור 1. דרוש למצוא את הפסד העומד של המערכת הזאת בספיקות שונות  
של המשאבה.

היות והקו מרכב מ-4 קטעים ("אלמנטים") שונים, בבודד על המכשיר 4 סרטים  
(ציור 2). יתר הסרטים אינם דרושים לפתרון זה והם מוזזים לקצה המכשיר שמאלה  
(אינם נראים בציור). מבין 4 הסרטים הדרושים לפתרון, כל סרט מבטא אלמנט, הסרט  
הימני מבטא את האלמנט מס' 1 הסרט השמאלי מבטא את האלמנט מס' 4. מסובבים את  
הסרטים בכוון רחבי באופן שבכל סרט, סמון הקוטר יתלכד עם סמון האורך שעל הלוח  
הנע - למשל: סמון ה"4 שעל הסרט מס' 1, מתלכד עם הקו של 100 מ' שעל הלוח הנע  
ובכך מבטא הסרט הזה את אלמנט 1 שבו הקוטר 4" והאורך 100 מ'. לאחר זאת מזיזים  
את סרט 2 בכוון אורכי באופן שהמרחק בין סרט 1 וסרט 2 יהיה - בקצ"מ של סקלת  
הספיקות - כמו הספיקה היוצאת בין אלמנט 1 לאלמנט 2; לו היתה נכנסת ספיקה  
בצומת זאת (ולא יוצאת) היה סרט 2 מוזז ימינה מסרט 1 (ולא שמאלה). בצורה זאת  
קובעים את מקומם של כל הסרטים. סדור הסרטים נראה בציור 3.

לאחר זאת מזיזים את הלוח הנע (ציור 4) באופן שהצד השמאלי של סרט מס' 4  
יתלכד עם הסמון של ספיקת המשאבה (בציור 4: 280 מ"ק/ש'). האגפים של העקום מראים -  
בנקודות החתך שלהם עם הקצה השמאלי של כל סרט - את הפסדי העומד, בכל קטע, המתאימי  
לספיקה הנדונה של המשאבה: בקטע 4 ההפסד הוא 3.7 מ' ובקטע 3: 5.3 מ'. הצד השמאלי  
של כל קטע<sup>60</sup> חותך על סקלת הספיקות (שעל הלוח הנע) את הספיקה הזורמת באותו קטע  
(בקטע 4: 280 מ"ק/ש', בקטע 3: 180 מ"ק/ש' וכו'). סרט מס' 1 נחתך ע"י האגף  
הימני של העקום (ולא ע"י השמאלי כמו שאר הסרטים) דבר זה מצין כי בקטע זה  
הזרימה היא בכוון הפוך לזאת שביתר הקטעים כלומר: לקטע זה זורמים מים מהברכה ולא  
מהמשאבה.

אם נזיז את הלוח הנע למצב אחר - נקבל שורת נתונים אחרים המתאימה לספיקה  
אחרת של המשאבה. לדוגמה: הלוח הנע מוזז למצב המתואר בציור 5. ספיקת המשאבה היא  
230 מ"ק/ש', הפסד העומד בקטע 4 הוא 2.6 מטר ובקטע 3: 2.9 מ'. שני קטעים אלה  
נזונים מהמשאבה ואלו האחרים - מהברכה.

כל מצב של הלוח הנע יתן שורת נתונים חדשה המתאימה לספיקה מסוימת של  
המשאבה. כדי לקבל שורת נתונים אחרת - יש להזיז את הלוח הנע בלבד. כל הזזה של  
הלוח הנע מראה את הפסדי העומד ואת כוון הזרימה בכל קטע - וכתוצאה מכך ניתן  
לקבוע מיד את העומד בכל צומת על הקו (ציור 2) וכן לקבוע את "עקום ההתנגדות"  
של מערכת הצנורות הזאת.

## 3. אופן פתרון טבעת פשוטה

נתונה טבעת פשוטה (טבעת המהווה מעגל סגור אחד) ובה מספר "אלמנטים"  
(צנורות) בין כל 2 אלמנטים - יוצאת או נכנסת ספיקה.

נתייחס לציור 6 בו נתונה טבעת כזאת עם 4 אלמנטים. מוכנסת לטבעת ספיקה  
של 300 מ"ק/ש', העומד בראש הטבעת הוא +100 ובנקודות שונות עליה נצרכות ספיקות  
של 50, 100, 150 מ"ק/ש'. הנתונים החסרים שעליהם יענה הפתרון הם: איזו ספיקה  
זורמת בכל אחד מהאלמנטים (הצנורות) ומהו העומד בכל אחת מהצמתות.



לשם פתרון הטבעת, במספר תחילה את האלמנטים שלה בכוון מסויים (כנגד כוון השעון), נקח סרטים כמספר האלמנטים (ציור 3). יתר הסרטים אינם דרושים לפתרון זה והם מוזזים לקצה המכשיר שמאלה (אינם נראים בציור). מבין 4 הסרטים הדרושים לפתרון, כל סרט מבטא אלמנט, הסרט הימני מבטא את האלמנט מס' 1 הסרט השמאלי מבטא את האלמנט מס' 4. מסובבים את הסרטים בכוון רחבי באופן שבכל סרט, סמוך הקוטר יתלכד עם סמוך האורך שעל הלוח הנע - למשל: סמוך ה"4 שעל הסרט מס' 1, מתלכד עם הקו של 100 מ' שעל הלוח הנע ובכך מבטא הסרט הזה את אלמנט 1 שבו הקוטר 4" והאורך 100 מ'. לאחר זאת, מזיזים את סרט 2 בכוון אורכי באופן שהמרחק בין סרט 1 וסרט 2 יהיה - בקב"מ של סקלת הספיקות - כמו הספיקה היוצאת בין אלמנט 1 לאלמנט 2; לו היתה נכנסת ספיקה בצומת זאת (ולא יוצאת) היה סרט 2 מוזז ימינה מסרט 1 (ולא שמאלה). בצורה זאת קובעים את מקומם של כל הסרטים. סרט 1 מוזז ימינה מסרט 4 ב-300 מ"ק/ש' שכן בצומת שבין 1 ל-4 נכנסת ספיקה של 300 מ"ק/ש'.

לאחר סדור הסרטים, יש להזיז את הלוח הנע (ציור 5) עד למצב שבו האגף הימני של העקום חותך אותו סכום של הפסדי עומד (על סקלות הפסדי העומד) - כמו האגף השמאלי: כל אגף חותך 5.5 מ'. מצב זה נותן את פתרון הטבעת: העקום חותך, כאמור, על כל סרט את הפסד העומד באלמנט, השפה השמאלית של כל סרט חותכת על סקלת הספיקות את הספיקות הזורמות וכוון הזרימה מסתבר מכך שכל הסרטים הנחתכים ע"י אגף אחד של העקום - מראים כוון אחד והאחרים - כוון הפוך.

סרט 1 מראה 70 מ"ק/ש', סרט 2: 20 מ"ק/ש', סרט 3: 130 מ"ק/ש', סרט 4: 230 מ"ק/ש'.

באלמנטים 1,2, הזרימה הינה בכוון אחד וב-3,4 - בכוון הפוך. נתוני הפתרון נראים בציור 7.

במקרה ש  $C.h.w. \neq 90$  (בצורות פלדה) יוחלף סמוך הקוטר בצנור בנקודה אחרת שעל סקלת הקטרים; נקודה זאת תמצא בעזרת סקלת C הנמצאת בקצה הימני של הלוח הנע: מרחק הנקודה מעל או מתחת לסמוך הקוטר הוא כמו מרחק ה-C המבוקש מעל או מתחת ל-90 = C על גבי סקלת C.

במקרה של כמה צנורות בקטרים שונים שאין ביניהם יציאת ספיקה, צריך להפכם לקוטר שקול. אם למשל נתון קוטר 4" באורך 100 מ' ונדרש להפכו לאורך שקול של קוטר אחד - מזיזים סרט אחד למצב שבו סמוך 4" מתלכד עם סמוך 100 מ' (כמו בדוגמה שבסעיף 5) וכל סמוכי הקטרים שבאותו סרט מתלכדים עם סמוכי אורכים שהם הארכים השקולים המבוקשים.

#### 4. דוגמה נוספת (רשת הזזונה מ-2 ברכות)

נתונה רשת הזזונה מ-2 ברכות (ציור 8) בעיה זאת נפתרת בצורה דומה לבעית טבעת - אולם בעוד שפתרון טבעת מבוסס על כך שב-2 קצותיה שורר אותו עומד - כאן מבוסס הפתרון על כך שב-2 הקצוות שורר הבדל עומדים - (8.7 מטרים).

סדור הסרטים עבור פתרון בעיה זאת הוא כמו בציור 3; לאחר סדור הסרטים מוזז הלוח הנע עד למצב שבו אגף אחד של העקום (השמאלי) חותך הפסד עומד ב-8.7 מ' יותר מאשר השני (ציור 4).

ציור 9 מראה את מצב הזרימות המתקבל: הברכה הנמוכה מספקת 20 מ"ק/ש', הגבוהה: 280 מ"ק/ש'.



5. פתרון טבעות מורכבות

פתרון רשתות המהוות יותר מטבעת סגורה אחת - כרוך בגשוש יותר ארוך. להלן 2 דוגמאות לפתרון רשת בעלת 2 טבעות.

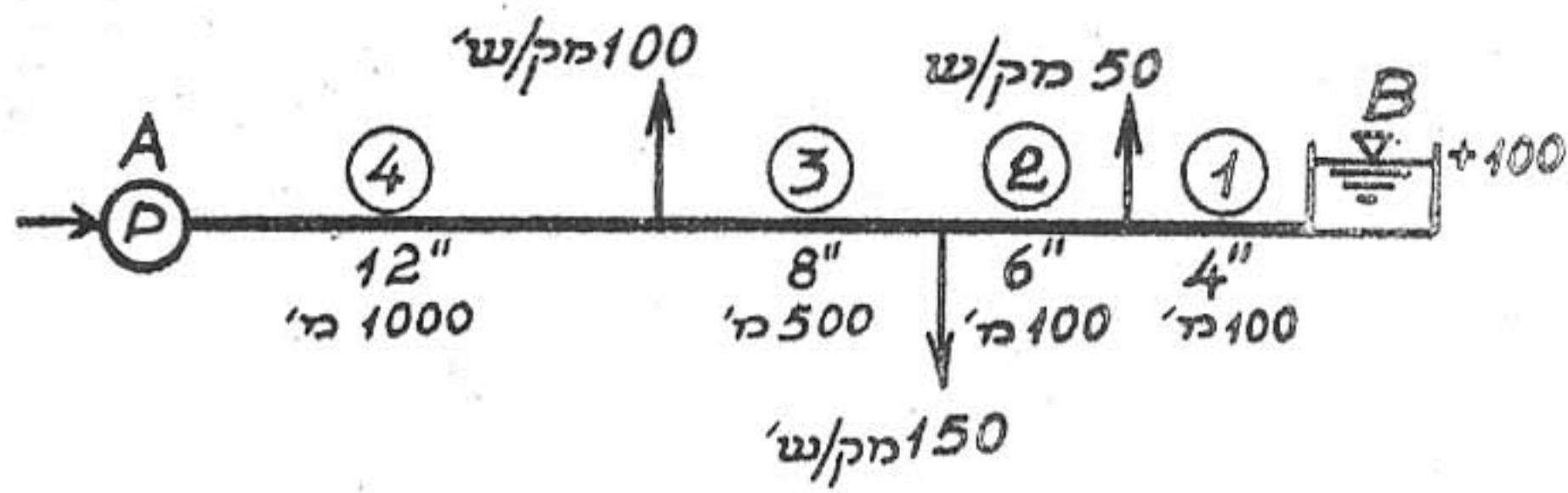
(א) פתרון רשת של 3 אגפים (ציור 10). עורכים את הסרטים של כל אחד משלושת האגפים בנפרד, לאחר זאת, מניחים ספיקה מסוימת הנכנסת לאגף 1 וקוראים (ע"י אגף אחד של העקום) מהו הפסד העומד שיהיה באגף זה. לאחר זאת, מזיזים את העקום לקבוצת הסרטים של אגף 2 ומוצאים את הספיקה שתיצור באגף זה אותו הפסד עומד. את הספיקה באגף 3 קובעים ב-2 דרכים: (א) כמו באגף 2. (ב) כהבדל בין כלל הספיקה הנכנסת לרשת לספיקות הנכנסות לאגפים 2, 3. אם הספיקות באגף 3 שחושבו ב-2 הדרכים השונות - מזדהות - הרי ההנחה בדבר הספיקה הנכנסת לאגף 1 היתה נכונה; אם לא - יש לקחת את הממוצעת ביניהן ולחזור על הפעולה - הפעם מאגף 3. ממשיכים בדרך זאת עד להשגת הדיוק הרצוי.

(ב) פתרון רשת של 2 טבעות (ציור 11). פותרים תחילה את הרשת כאילו אלמנט (צנור) 2 אינו קיים - (פתרון מס' 1). לאחר זאת, רואים מהו הפרש הלחצים בין צומת 1-2-3 לבין צומת 2-4-5 - נניח:  $h_1$ ; 2 ; לוקחים את חצי ההפרש הזה:  $h_1$  (זהו הממוצע בין ההפרש לבין מצב שבו אין הפרש בכלל) ובודקים מהי הספיקה המתאימה - באלמנט 2 - להפסד לחץ בשעור  $h_1$ ; הספיקה המתאימה היא  $Q_1$  וכוונה אל העומד הקטן, נניח אל צומת 2-4-5. פותרים את הטבעת שנית באופן שבצומת 1-2-3 יוצאת ספיקה הגדולה ב-  $Q_1$  מזו שבחשוב הקודם ובצומת 2-4-5 יוצאת ספיקה הקטנה ב-  $Q_1$  מזו שבחשוב הקודם, קוראים שנים את הפרש הלחצים כנ"ל, נניח:  $h_2$  ומחשבים את הממוצע  $\frac{1}{2} (h_1 + h_2) = h_3$  וחוזרים על הפעולה עד ש -  $h_n = h_{(n+1)}$  (עד למידת הדיוק הרצויה).



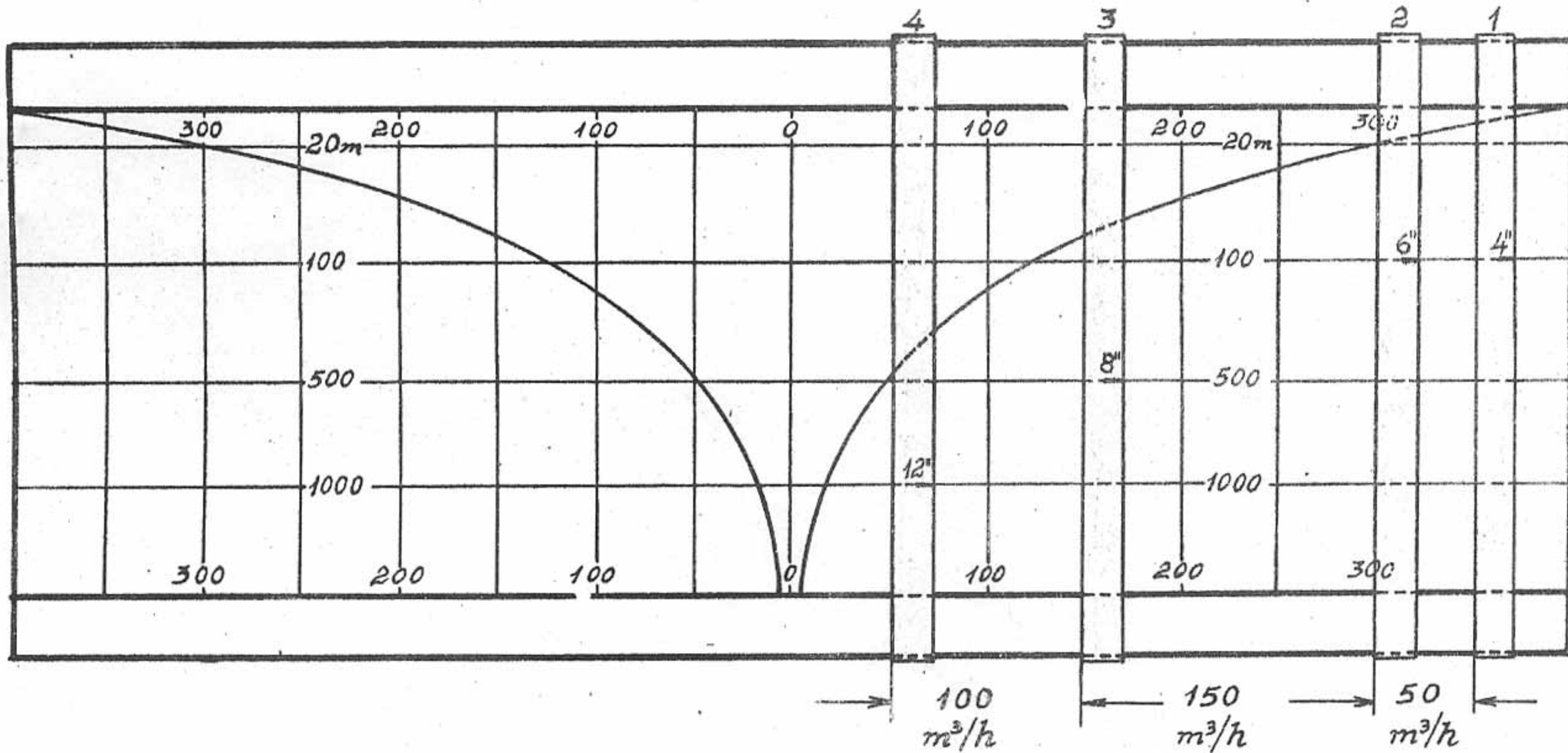
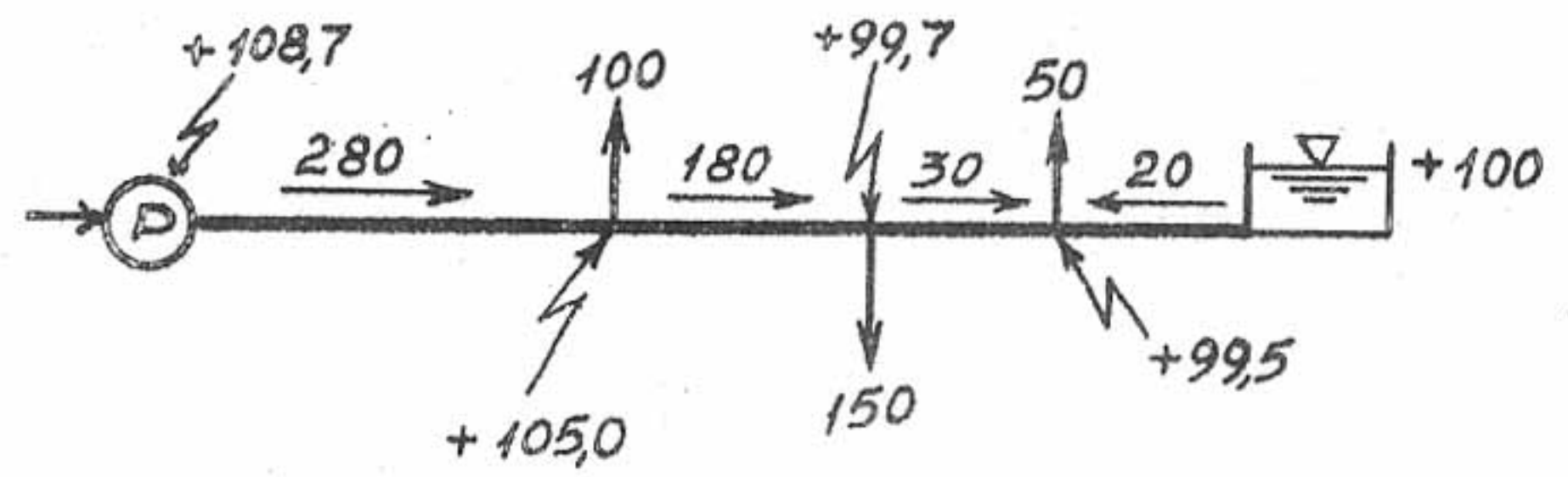
## ציור 1

משאבה המספקת למערכת צנורות



## ציור 2

וכמת זרימה במקרה שהמשאבה מספקת 280 מ"ק/ש

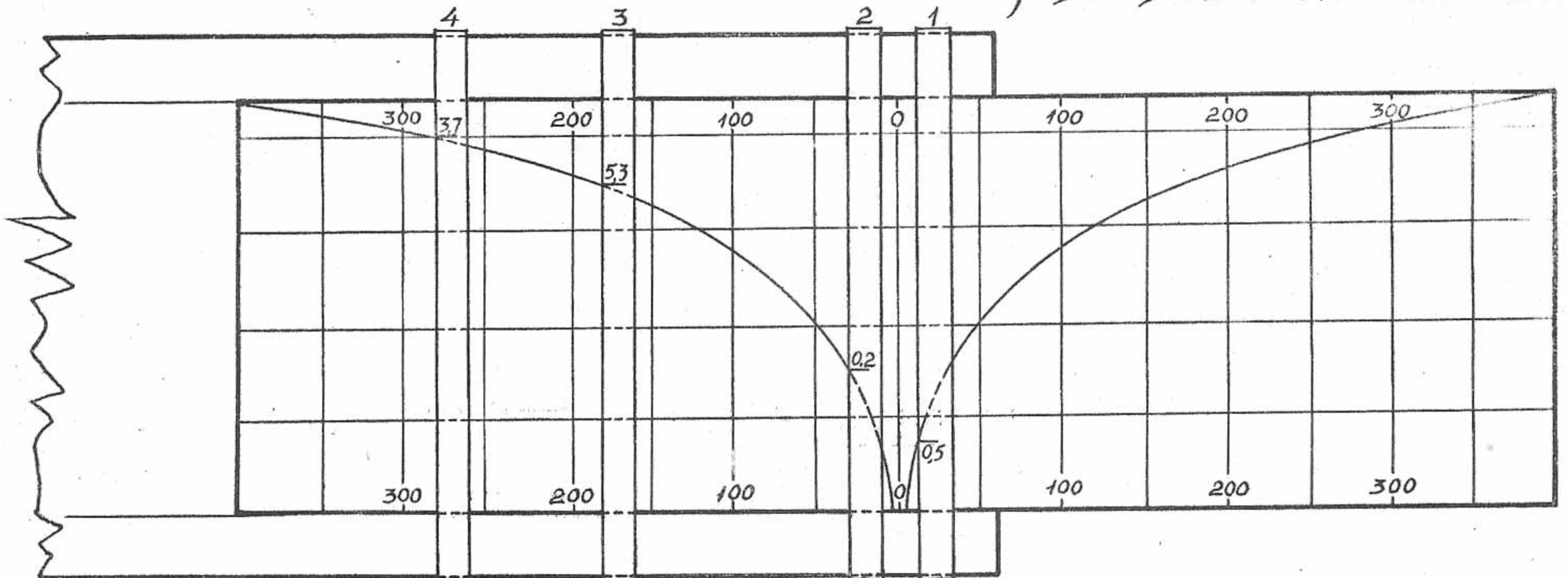


## ציור 3

סדור הסרטים על המכשיר

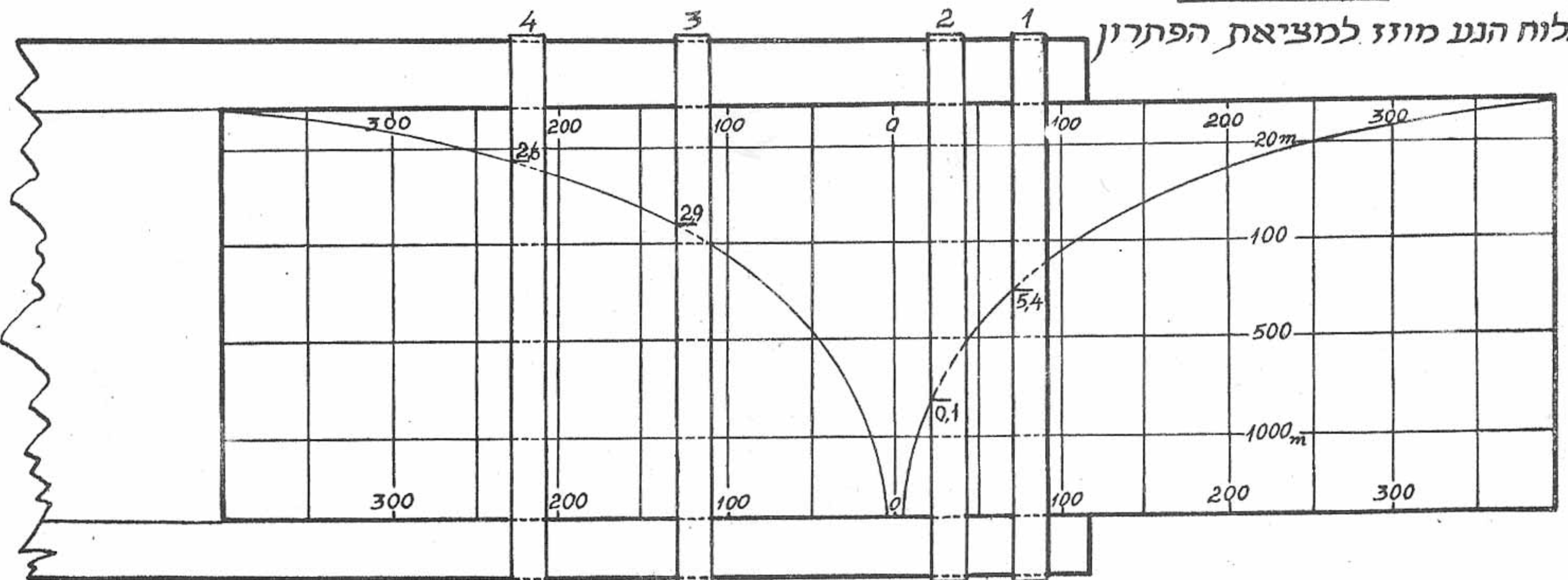
## ציור 4

הלוח הנע מוזז למציאת הפתרון



## ציור 5

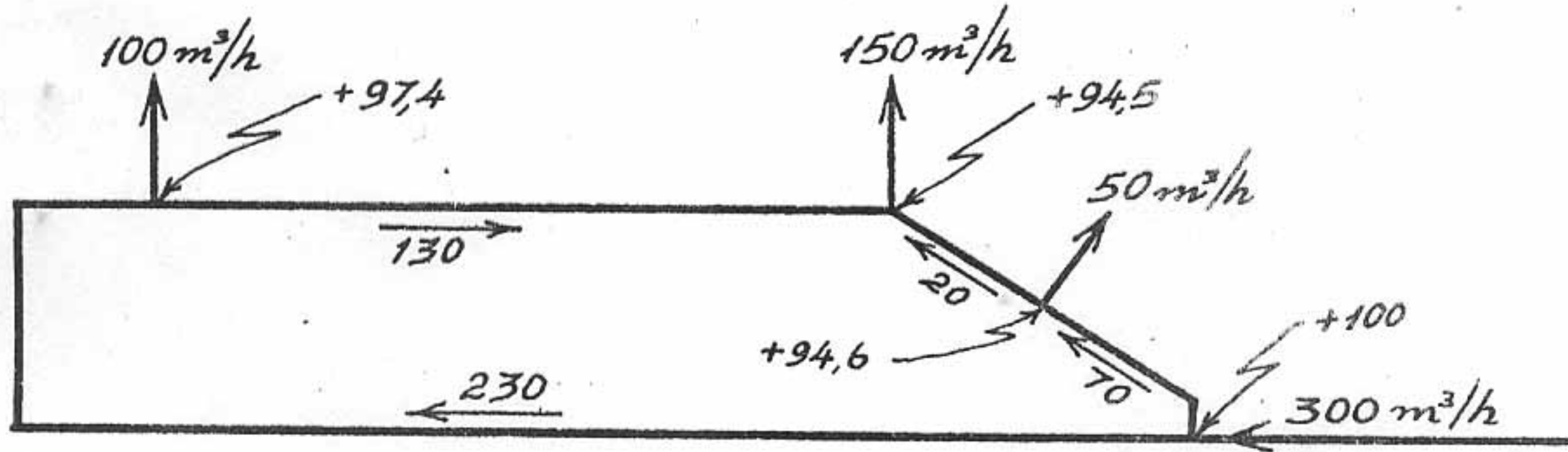
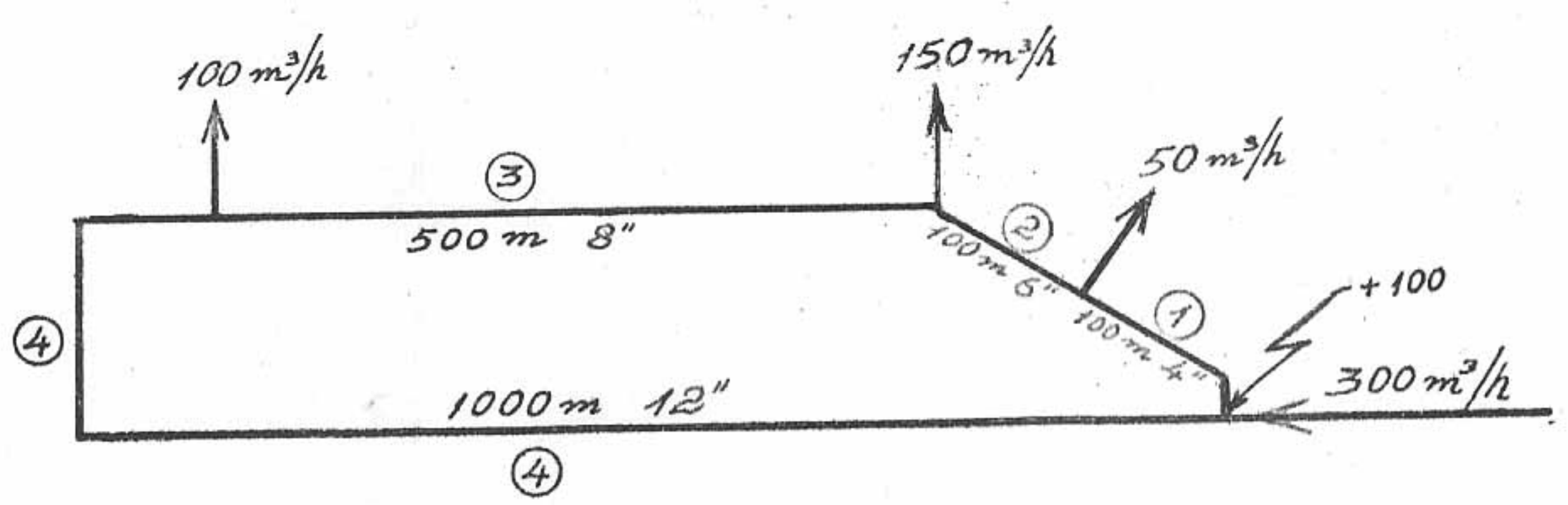
לוח הנע מוזז למציאת הפתרון





## ציור 6

בעית הטבעת

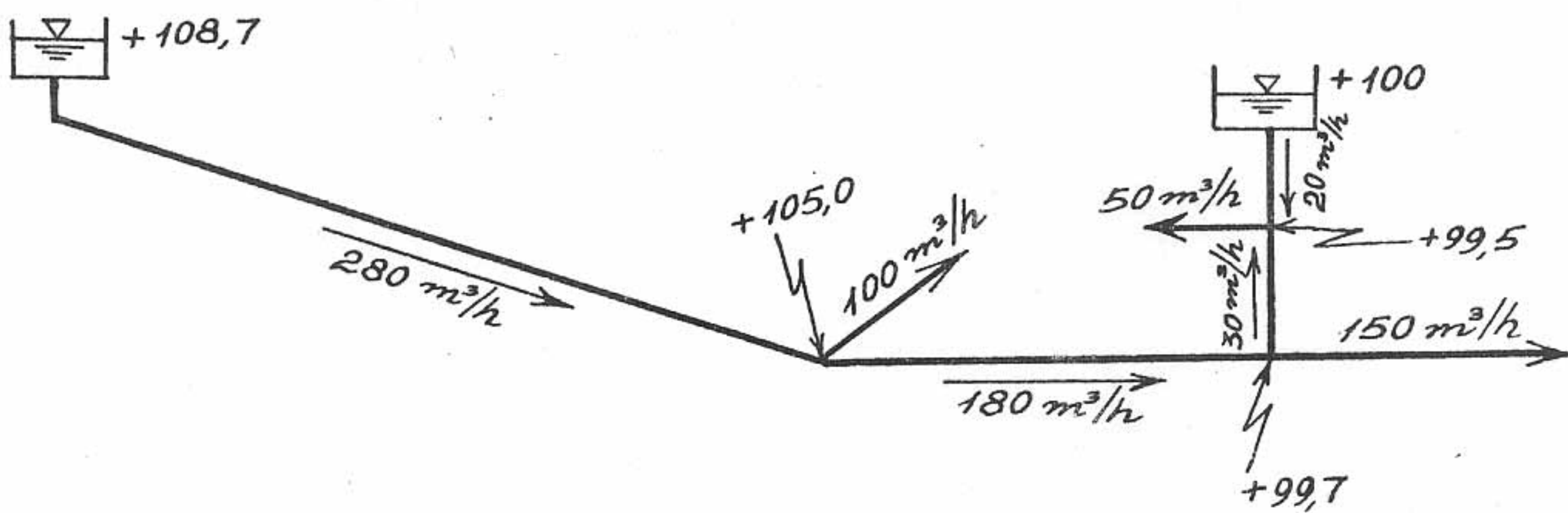
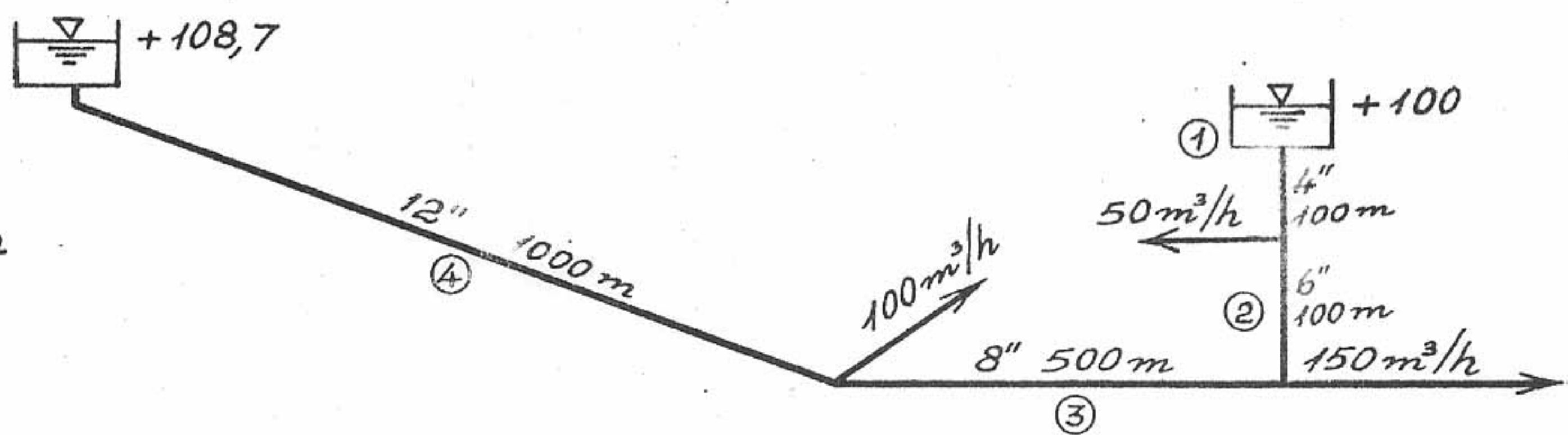


## ציור 7

סכמת הזרימה בטבעת

## ציור 8

בעית רשת הנזונה מ 2 ברכות

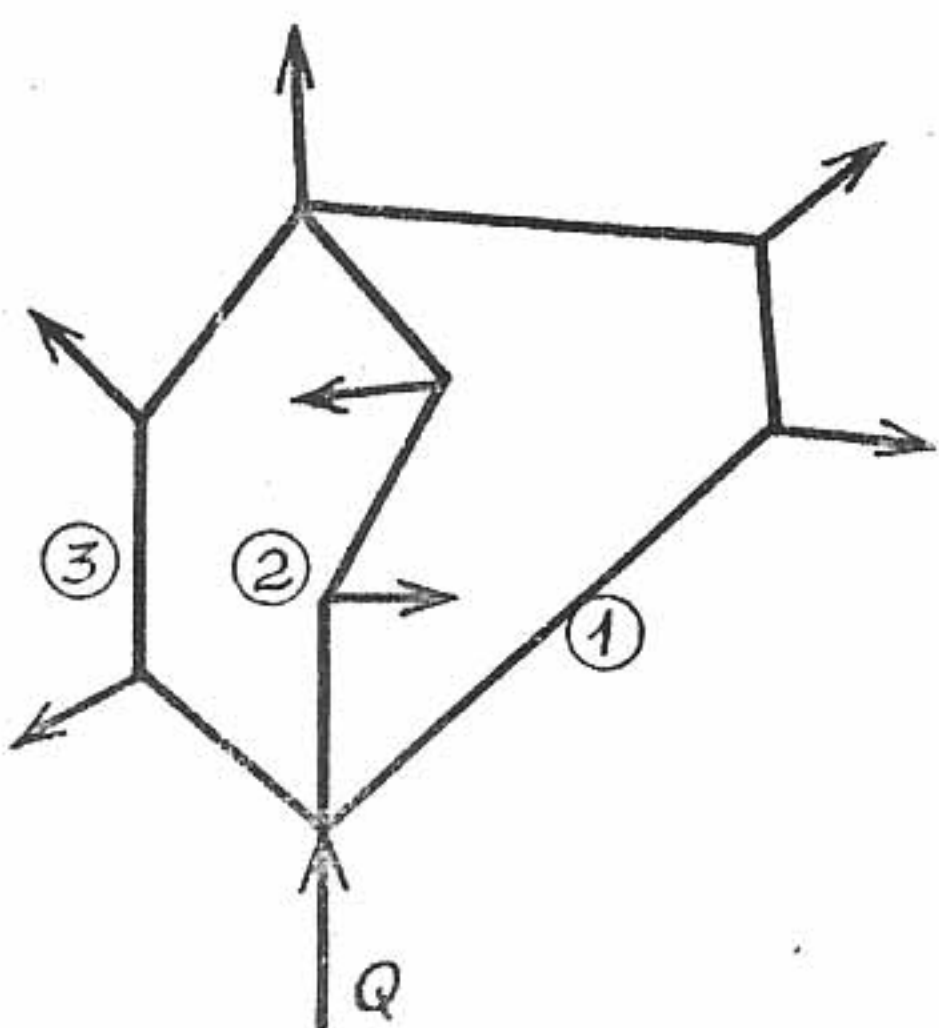


## ציור 9

סכמת זרימה ברשת הנזונה מ 2 ברכות

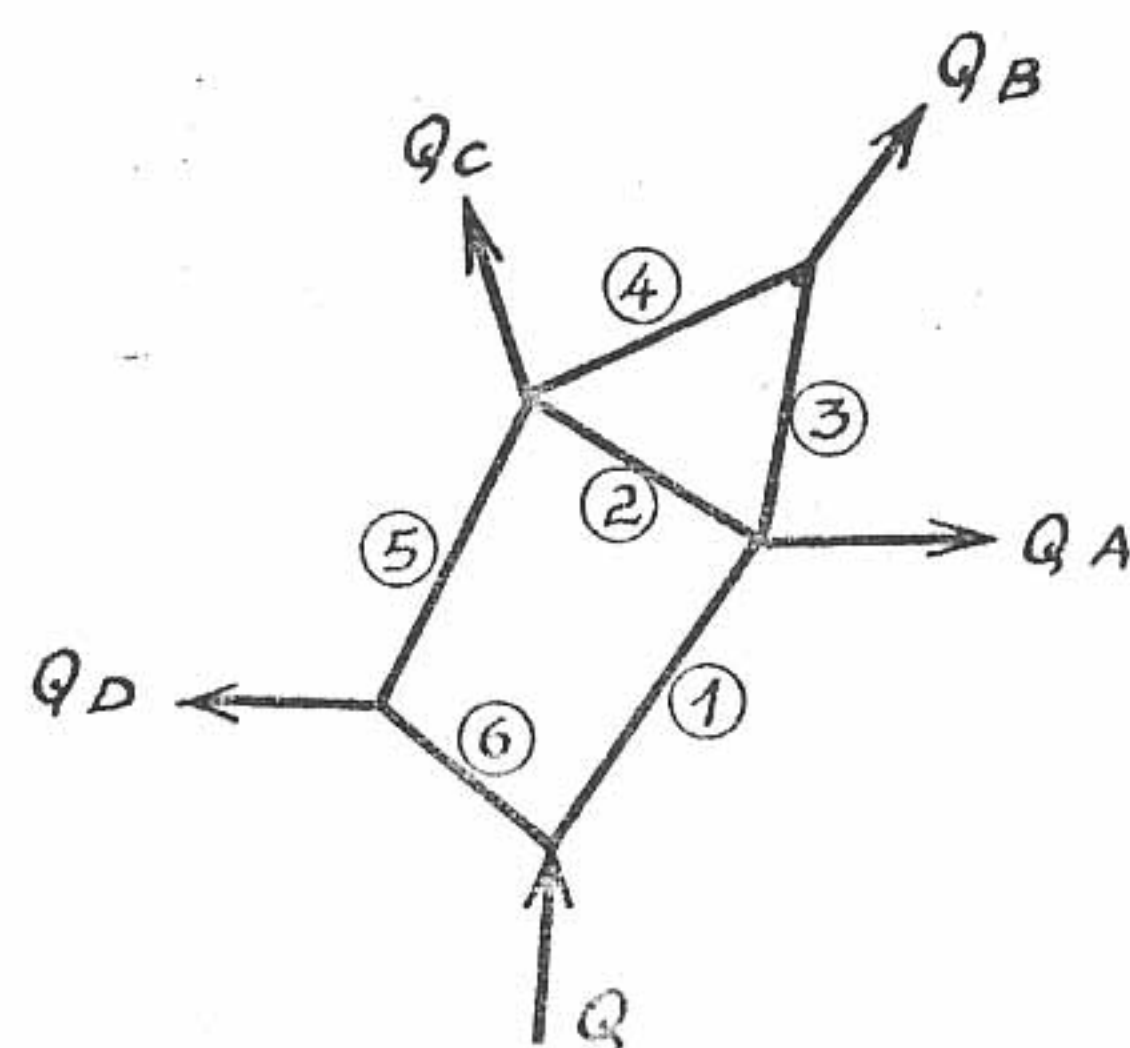
## ציור 10

טבעת של 3 אגפים



## ציור 11

רשת של 2 טבעות



דוגמאות החישוב וכן תאור  
 מתאימים לסרגל מדגם א' שבו ה

הסרגל המוכאים בדפים אלה -  
 יקה המקסימלית היא 400 מ"ק/ש.

קטרי הצנורות בכל הדגמים  
 הנהוגה כדלקמן: בקטרי צנורות  
 המדה הנומינלית למדה האמתית -  
 ומעלה, קטנה המדה האמתית מהנ  
 (פלדה ואזבסט) נתונים בהתאם ל

נתונים ע"פ המדה המסחרית  
 שון (מ-18" ומעלה) - מתאימה  
 בקטרי צנורות פלדה מ-14"  
 וינלית ב-1/2". יתר הקטרים  
 לבלה הבאה :

מדה נומינלית	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"	16"
קוטר צנורות אזבסט (מ"מ)	50	75	99	152	201	252	301	353	404
קוטר צנורות פלדה (מ"מ)		81	106	158	209	263	313		