

# דרכים לזיהוי כושר העמסת כבלים מתח גבוה

## איציק מוסקוביץ סמנכ"ל איכות סינרג'י כבלים.

### 1. רקע.

כיום בעולם המודעות לנושא העמסת הזרם של מרכיבי מערכת החשמל (ייצור, הולכה, וחלוקה), הולכת וגדלה. לכך יש מספר סיבות: ראשית העומסים עולים בהתמדה. שנית קיים רצון עז לשלוט בקיבולת העמסה על מנת לקבל אופטימיזציה כלכלית (מחירי המתכות מאמירים משנה לשנה). והסיבה השלישית היא הזרמים הזורמים ברשת נהפכים לבלתי צפויים, כלומר הרשת מתגמשת מכוון ש:

1.1 קיימת עלייה ביכולת לייצר חשמל עקב מקורות האנרגיה החלופית: אנרגיית רוח, ואנרגיה סולארית מהשמש. כמות האנרגיה המיוצרת בנקודה מסוימת ברשת נהפכת לבלתי צפויה. קשה לבחון מהי כמות האנרגיה המופקת בזמן מסוים ע"י מקורות אלו, מה שיכול להוביל לזרמים גבוהים, ובלתי צפויים ברשת.

1.2 עם התקדמות תהליך ההפרטה בעולם, ובאירופה במיוחד, נוצרות לעיתים חברות נפרדות האחת לייצור, והשנייה להולכה וחלוקה. לפיכך ייצור האנרגיה ימוקם היכן שהכי משתלם כלכלית לייצר אותו, ולא במקום בו הוא הכי נדרש. לפיכך קיימת אי ודאות ברשת החשמל מייצור אנרגיה, והיכן ברשת היא תיוצר. וכך בהולכת האנרגיה, במקום מסוים תהיה זרימת אנרגיה גבוהה מהמתוכנן. גמישות הרשת היא היכולת להוליך את הזרמים הבלתי צפויים, ובזה מושקעת מחשבה רבה, בתכנון קיבולת עומס הקווים (כבלים תת קרקעיים).

בכבלים בהם זרמי האנרגיה זורמים, יש מגבלות הנובעות מהיכולת להוליך את הזרם, אנו הוגים תכונה זו כהעמסה (Ampacity) - שהיא בפועל הזרם המקסימלי אותו אנו יכולים להזרים בכבל, כל עוד לא נעבור את הטמפרטורות המותרות במרכיבי כבל (כבל עם בידוד XLPE 90 מעלות, PVC 70 מעלות, ועוד...), לאורך חיי הכבל. הבנה טובה של האפשרויות שעומדות בפני מהנדס החשמל, יעזרו לו לבצע את ההחלטות הנכונות הנוגעות לתפעול, תחזוק, שימור, חידוש או הרחבת רשת הכבלים התת קרקעית.

חשיבות הכבלים התת קרקעיים עם השנים רק עולה, כתחליף יחיד להולכת אנרגיה לקווים העיליים. כמובן שהצורך בהחלפת הכבלים מסיבה כלשהי איננה פשוטה, התקנת הכבלים יקרה (פי 7 מקו עילי). מה שמחזק את החשיבות למציאת רזרבת העמסה על רשת כבלים קיימת, וזה עומד כמובן מול הוספת רשת כבלים חדשה לצורך הגדלת קיבולת העמסה (הוצאה כספית). לפיכך המגמה היום בעולם היא להגיע עם רשת הכבלים הקיימת להעמסה מקסימאלית.

קיימת גם סיבה היסטורית, יכולת העמסה של כבל נקבעת בשלב התכנון ההנדסי הראשוני, ומבוססת על הסיטואציה הראשונית ומספר הנחות. במדינות רבות היום בעולם רשת הכבלים התת קרקעית בת עשרות שנים, וכמובן שאז נושא העמסה לא היה מפותח כמו היום. בעבר לא היתה שום התייחסות להעמסה דינאמית או לסביבת הכבל, המשפיעים רבות על היכולת של כבל להעביר זרם. זוהי סיבה נוספת להתייחס בכובד ראש לכל נושא העמסת כבלים.

במאמר אתן סקירה לכל נושא העמסה צעד אחר צעד ואתרכז בעיקר בכבלי המתח הגבוה והעליון.

## 2. מקורות חום:

ישנם 5 מקורות חום שונים במערכת הכבל:

- הפסדי הולכה.
- הפסדים דיאלקטריים.
- הפסדי מעטפת/סיכוך.
- הפסדי שריון (במידה שיש).
- חיצוני.



[1] מקורות החום בכבל

### 2.1 הפסדי הולכה (הפסדים במוליך הכבל):

הפסדים המשפיעים ביותר על העמסת הכבל, נוצרים כתוצאה מההתנגדות החשמלית של המוליך, פרופורציונלים לריבוע הזרם שעובר דרכו:

$$W_C = I^2 \cdot R \quad (1)$$

כאשר הזרם הינו AC ולא DC קיימות מספר תופעות המשפיעות משמעותית על גובה הפסדים:

- אפקט הקרום (Skin Effect)
- אפקט הקרבה (Proximity Effect)
- אפקט הטמפרטורה.

אפקטים אלו תלויים בגיאומטריה של המוליך, החומר ממנו הוא עשוי, ממבנה המוליך, ומהמיקום היחסי שלו למוליכים האחרים. התנגדות המוליך בזרם חילופין תבוטא כך:

$$R_{ac} = R_{20} \cdot (1 + \alpha_{20} \cdot (\theta(t) - 20)) (1 + \gamma_S + \gamma_P) \quad (2)$$

$$R_{20} = \frac{\rho \cdot l}{A} \quad \bullet \text{ התנגדות DC ב } 20^\circ\text{C}$$

$$\alpha_{20} = \quad \bullet \text{ קבוע הטמפרטורה ב } 20^\circ\text{C}$$

$$\theta(t) = \quad \bullet \text{ טמפרטורת המוליך.}$$

$$\gamma_S = \quad \bullet \text{ קבוע אפקט הקרום.}$$

$$\gamma_P = \quad \bullet \text{ קבוע אפקט הקרבה.}$$

- אפקט הקרום (Skin Effect)** - בנוכחות זרם חילופין, קיימים שדות מגנטיים, הדוחפים את הזרם הזורם במוליך לדפנותיו. ולכן ההתנגדות האפטיבית גדלה. תופעה זו מגדילה משמעותית את התנגדות המוליך. הפתרון לכך הוא מוליך

במבנה המיליקן (ראה תמונה מס' 1). שהינו מוליך המחולק למספר מוליכים קטנים יותר הנקראים סיגמנטים, והם מבודדים האחד מהשני.  
 ii. **אפקט הקרבה (Proximity Effect)** - כאשר זרם חילופין זורם במוליך הכבל הוא מייצר שדה מגנטי סביב הכבל. כאשר קיימים כבלים הקרובים לכבל, השדה המגנטי משפיע על צפיפות הזרם במוליך הכבלים הללו. גם כאן הפתרון הוא במבנה המיליקן.

קבוע הטמפרטורה של מוליכי מחומר הנחשת שונה מזה של אלומיניום:  
 $\alpha_{20}(\text{Copper}) = 0.00393$        $\alpha_{20}(\text{Aluminum}) = 0.00404$   
 כך שב  $90^{\circ}\text{C}$  היא טמפרטורת העבודה המקסימלית של XLPE באזור המוליך, התנגדות מוליך אלומיניום תהיה גדולה ב-28% לעומת אותה התנגדות ב- $20^{\circ}\text{C}$ .

שטח חתך המוליך $[\text{mm}^2]$	$\gamma_s$	$\gamma_p (0.15 \text{ מ'})$
500	0.05	0.1
1000	0.2	0.25
1500	0.4	0.35
2000	0.6	0.4
2500	0.75	0.43

טבלה מס' 1 - בכמה מגדיל השפעות ה-AC (קרומ, וקרבה) את ההתנגדות כתלות בחתך.

## 2.2 הפסדים דיאלקטריים:

לחומר הבידוד של כבלי מתח גבוה יש תכונות של קיבול והתנגדות, למעשה יחד עם הסיכוך המוארק, המוליך, והבידוד נוצר קבל צילנדרי. הקיבוליות איננה מושלמת ולמעשה ישנם זרמים הזורמים בבידוד - מהמוליך לסיכוך. גודל הזרם תלוי בהתנגדות  $R_i$  המייצגת הפסדים הנובעים בעיקר מ:

- i. הפסדי הולכה.
- ii. הפסדי דיפול.
- iii. הפסדי התפרקויות חלקיות.

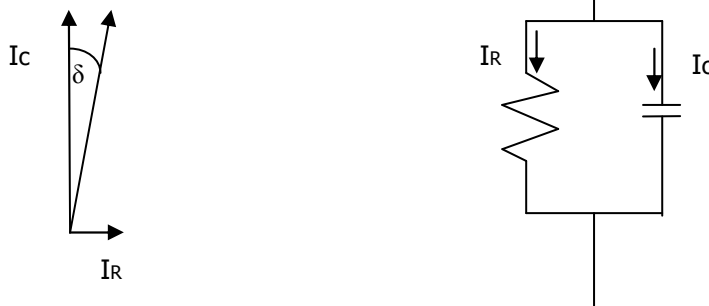
$$W_d = U^2 \cdot w \cdot C \cdot \tan \delta \quad (3)$$

$W_d$  מייצג את ההפסדים הדיאלקטריים בוואטים.

$\delta$  - מייצגת את הזווית בין  $I_c$  ל- $I_R$  כאשר  $\tan \delta$  היא תכונה ידועה של הכבל או נמדדת.

הפסדים אלו רלוונטים בעיקר בכבלי מתח עליון ועל, במתח גבוה הם נזנחים.

[2] סקיצה עקרונית של כבל:

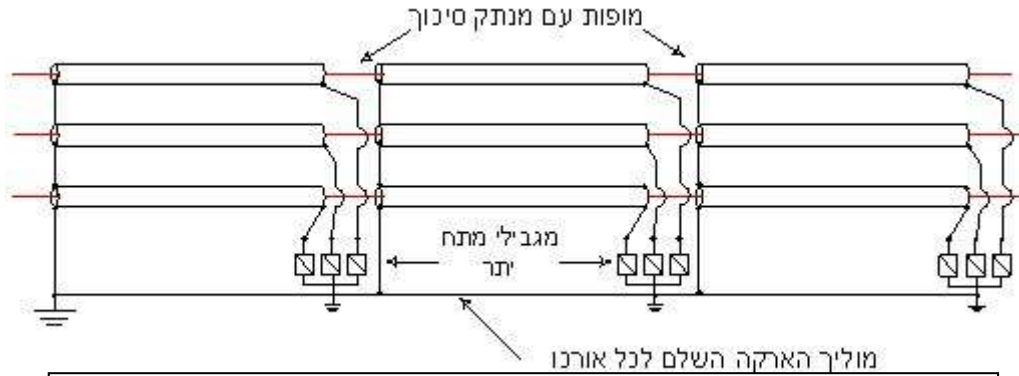


## 2.3 הפסדי מעטפת/ סיכוך:

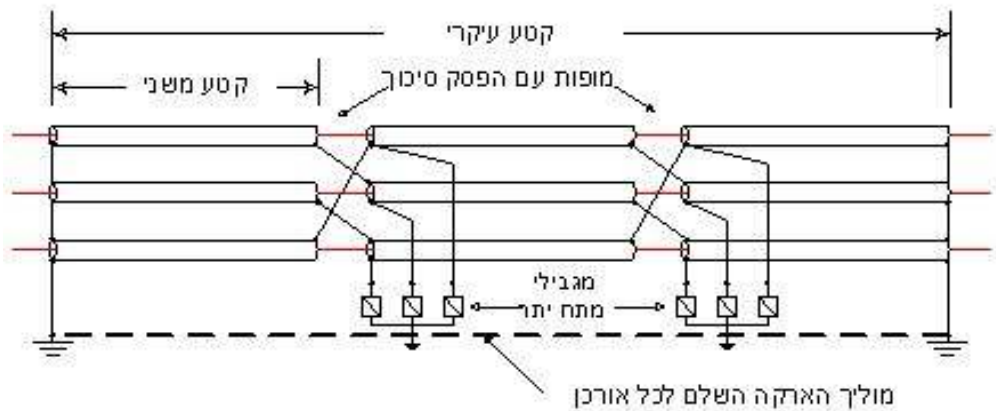
מכון שיש זרמים הזורמים דרך הסיכוך המוארק בכבלי חשמל, נוצר חום. ישנם שני סוגי זרמים:

- i. **זרמי סירקולציה** - במערכת תלת פאזית, בה כבלים חד פאזים לכבל יש מוליך וסיכוך, כך שנוצרות 6 לולאות חשמליות נפרדות. כתוצאה מזרם באחת מהלולאות, מתח מושרה על 5 הלולאות האחרות. אפקט זה נקרא גם אפקט השנאי היוצר הפרש הפוטנציאלים על הסיכוך. הפרש הפוטנציאלים יכול לגרום לזרם לזרום בסיכוך המוארק. וכך נוצר מקור חום נוסף בסיכוך הכבל. זרם זה יכול להווצר רק כאשר הסיכוך מחובר מ-2 צדדיו ישירות

להארקה (2 Side Bonding) . כאשר הוא מחובר רק בצד אחד ישירות להארקה (Single Point Bonding), קיים מתח מושרה אבל לזרם אין לאן לזרום (הסיכוך באוויר, או שלעיתים הוא מחובר להארקה דרך מגביל מתח יתר - SVL). קיים מצב בו הסיכוך מחובר מ-2 צדדיו, ואין זרמי סיקולציה, מקרה זה הוא כאשר יש חיבור מוצלב (Cross Bonding). בשיטה זו הזרמים בסיכוך מנטרלים ע"י סידור חיבור חכם. בו הסיכוך מחובר כל 1/3 מעגל לסיכוך של פאזה אחרת, כך הזרמים המושרים בסיכוך של פאזה אחת מנטרלים את הזרמים המושרים של הפאזה המוצלבת. יתכן מצב של זרמים מושרים שלא מתבטלים מכיון שאינם זהים בגודלם, ואז מערכת החיבורים המוצלבים איננה מאוזנת.



[3] שיטת חיבור סיכוך צד אחד ישירות לאדמה - Single Point Bonding.



[4] שיטת חיבור סיכוך מוצלב - Cross Bonding.

ii. זרמי "אדי" (Eddy currents) - נוצרים ע"י שדות מגנטים במעגל הכבל. נמצאים בכל סוגי החיבורים, אך מכיון שהם מהווים מקור חום יחסית קטן הם מוזנחים. הזרמים האלו יחד, הזורמים במעטפת המתכתית מבוטאים ביחס הנקרא גורם ההפסד: שהוא היחס בין החום המופק בסיכוך המוארק לבין החום המופק במוליך הכבל.

$$\lambda_1 = \frac{I_{EarthingSheath}^2 \cdot R_{EarthingSheath}}{I_{Conductor}^2 \cdot R_{Conductor}} \quad (4)$$

#### 2.4 הפסדי שריון:

בשריון קיימים אותם זרמים שהופיעו בסיכוך המוארק, אך מכיון שהשריון עלול להיות מחומרים מגנטים (ברזל, פלדה...) תהיה צורה נוספת של חום: היסטראזיס (קטן יחסית ולכן מוזנח בדר"כ).

$$\lambda_2 = \frac{I_{Armour}^2 \cdot R_{Armour}}{I_{Conductor}^2 \cdot R_{Conductor}} \quad (5)$$

ה. מקורות חום נוספים: מחוץ לכבל יתכנו מקורות חום נוספים כדוגמת כבלים אחרים החוצים את הכבל שלנו (בדר"כ הוא נחשב למקור חום במרחק הקטן מ 2 מטר).

### 3. פרמטרים נוספים המשפיעים על גודל העמסה של הכבל.

#### 3.1. עומק ההתקנה:

עומק ההתקנה משפיע על כושר העמסה של הכבל. קיימים 2 השפעות המשפיעות במקביל. הראשונה השמש, ככל שהכבל קבור עמוק יותר כך השמש פחות משפיעה על טמפרטורת הקרקע וכך ניתן להעמיס יותר את הכבל. השני קשור להתנגדות התרמית בסביבת הכבל. ההתנגדות התרמית של הסובב לכבל עולה ככל שיש יותר מסת אדמה. כלומר כבלים הקבורים עמוק יותר ההתנגדות התרמית של הסביבה גבוהה מזו של כבלים הקבורים פחות עמוק. כתוצאה מכך כבלים הקבורים עמוק יותר ניתן להעמיס פחות. ההשפעה הגבוהה יותר מבין שניהם היא ההתנגדות התרמית (בהתקנת כבלי מתח עליון עומק ההתקנה משמעותי), כך שבסיכום 2 ההשפעות כבל הקבור עמוק יותר ניתן להעמיסו פחות.

#### 3.2. צורת ההתקנה:

כבל חד פאזי ניתן להתקנה בהתקנה שטוחה (Flat) או התקנת תלתן (Trefoil). כל צורת התקנה משפיעה על המתחים המושרים בסיכוך המוארק לדוגמה בחיבור בצד אחד או בחיבור ב 2 הצדדים להארקה של הסיכוך. בחיבור ב 2 הצדדים ככל שהזרם על הסיכוך יהיה גבוה יותר כך העמסת הכבל תהיה נמוכה יותר. לדוגמה במבנה שטוח ככל שהמרחק בין הכבלים גבוה יותר אזי בחיבור בצד אחד המתח המושרה יהיה גבוה יותר, ובחיבור 2 הצדדים הזרם העובר בסיכוך יהיה גבוה יותר. השפעה נוספת היא היכולת לפזר חום. במבנה תלתן קשה יותר לכבל לפזר את החום לסביבה, וכך קורה שההתנגדות התרמית של הסביבה האופפת מבנה תלתן גבוהה מאשר הסביבה האופפת של כבל במבנה שטוח. לסיכום הנושא: למעגלים עם חיבור צד אחד להארקה, התקנה שטוחה תתן העמסה טובה יותר. בחיבור ב 2 הצדדים ככל שהמרחק יגדל כושר העמסה יקטן. בחיבור הסיכוך ב 2 הצדדים להארקה להתקנת תלתן יש יתרון קטן בכושר העמסה מאשר התקנה שטוחה.

### 4. מציאת הפרמטרים לחישוב כושר העמסה במצב מתמיד (Steady State):

#### 4.1. התנגדויות תרמיות:

כל החומרים הלא מוליכים בכבל יעכבו מעבר חום דרכם, מכל אותם מקורות חום שהוזכרו בסעיף 2. (ההתנגדויות התרמיות של החלקים המתכתיים מוזנחות). בכבל חד פאזי ההתנגדות התרמית  $R_{th1}$  היא ההתנגדות בין המוליך לסיכוך:

$$R_{th1} = \frac{\rho_1}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_1}{d_1}\right) \quad (\text{Km/W}) \quad (6)$$

$R_{th1}$  - התנגדות תרמית בין מוליך לסיכוך (הבידוד).  
 $\rho_1$  - התנגדות תרמית סגולית בידוד.  
 $t_1$  - עובי בידוד [מ"מ].  
 $D_1$  - קוטר המוליך [מ"מ].

$$R_{th2} = \frac{\rho_2}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_2}{d_2}\right) \quad (\text{Km/W}) \quad (7)$$

$R_{th2}$  - התנגדות תרמית בין סיכוך לשריון (המעטה/ מעטה בניים).  
 $\rho_2$  - התנגדות תרמית סגולית מעטה/מעטה בניים.  
 $t_2$  - עובי מעטה/ מעטה בניים.  
 $d_2$  - קוטר מעל הסיכוך.

$$R_{th3} = \frac{\rho_3}{2\pi} \cdot \ln\left(1 + \frac{2 \cdot t_3}{d_3}\right) \quad (\text{Km/W}) \quad (8)$$

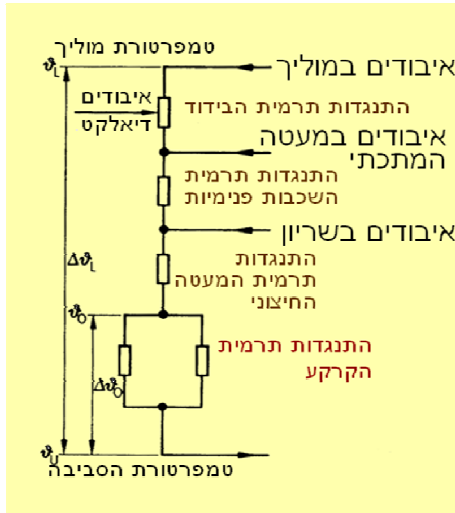
$R_{th3}$  - התנגדות תרמית בין משטח הכבל לשריון (מעטה חיצוני).  
 $\rho_3$  - התנגדות תרמית סגולית מעטה חיצוני.  
 $t_3$  - עובי מעטה חיצוני.  
 $d_3$  - קוטר חיצוני מעל לשריון.

$$R_{th4} = \frac{\rho_4}{2\pi} \cdot \ln\left(\mu + \sqrt{\mu^2 - 1}\right) \quad (\text{Km/W}) \quad (9)$$

$R_{th4}$  - התנגדות תרמית בין הכבל למשטח האדמה.  
 $\rho_4$  - התנגדות תרמית סגולית אדמה.  
 $\mu = 2L/de$   
 $L$  - מרחק מציר הכבל לפני האדמה (עומק התקנה).  
 $de$  - קוטר חיצוני של הכבל.

**התנגדויות תרמיות שימושיות ב (Km/W):**

- PE או XLPE 3.5
- PVC 5-6
- אדמה לחה 0.7-1
- אדמה יבשה 2-3



[5] זרימת החום בכבל

**הנוסחה הסופית לחישוב העמסה במצב מתמיד:**

(10)

$$T_c - T_o = R_{th1} \cdot \left[ I^2 \cdot R_{ac} + \frac{1}{2} W_d \right] + n \cdot R_{th2} \cdot \left[ I^2 \cdot R_{ac} (1 + \lambda_1) + W_d \right] + n \cdot (R_{th3} + R_{th4}) \cdot \left[ I^2 \cdot R_{ac} (1 + \lambda_1 + \lambda_2) + W_d \right]$$

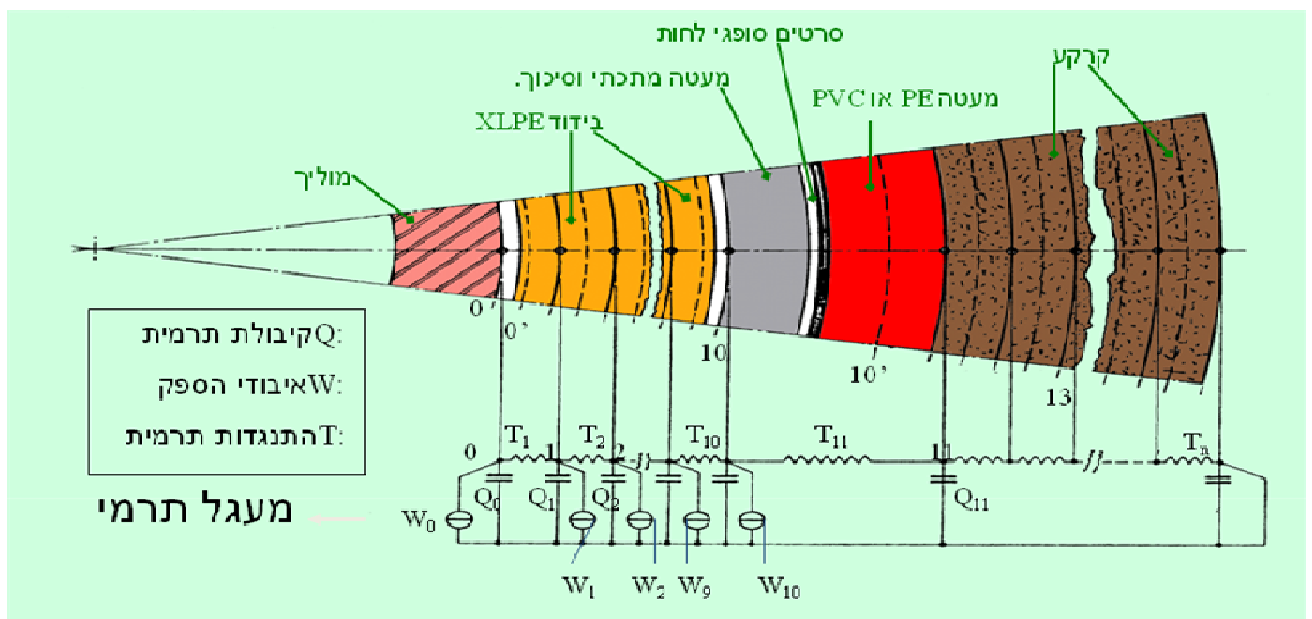
הפרש הטמפרטורה
עלייה בבידוד
עלייה בשכבות הפנימיות
עלייה במעטה החיצוני ובקרקע

כאשר:

- $T_c$  - טמפרטורת המוליך הסופית  $[C^0]$  (להעמסה מקסימלית בכבלי מתח גבוה  $90^{\circ}C$ ).
- $T_o$  - טמפרטורת האדמה/סביבה.  $[C^0]$
- $n$  - מספר המוליכים בכבל אחד (1, 3, או יותר).

**נחלץ את הזרם I מהנוסחה ונקבל את הזרם המירבי להעמסה:**

$$I = \sqrt{\frac{(T_c - T_o) - W_d \cdot \left[ \frac{1}{2} R_{th1} + n \cdot (R_{th2} + R_{th3} + R_{th4}) \right]}{R_{ac} \cdot R_{th1} + n \cdot R_{ac} \cdot R_{th2} \cdot (1 + \lambda_1) + n \cdot R_{ac} \cdot (R_{th3} + R_{th4}) \cdot (1 + \lambda_1 + \lambda_2)}} \quad (11)$$



[6]. מעגל תרמי כאנלוגיה למעגל חשמלי

## 5. צוואר בקבוק תרמי.

הכבלים התת קרקעיים מתנהגים בנושא העמסה כמו שרשרת ארוכה שחוזקה התרמי נקבע לפי הנקודה החלשה ביותר בשרשרת. כלומר כושר העמסה מקסימלי של המעגל יקבע על פי הנקודה החלשה התרמית בתוואי הכבל. זו בדרך כלל אזור מוגבל אחד, שלעיתים ניתן לטיפול, ולעיתים לא. צווארי בקבוק תרמים ימצאו בדרך כלל בתוואי:

5.1. ליד תחנות משנה.

5.2. באזורים בהם הכבל קבור באדמה רדודה (כמו כניסה או יציאה מתחנת משנה).

5.3. אדמה בעלת תכונות תרמיות נמוכות (אדמה יבשה או סוג האדמה).

5.4. מתחת לגשרים, תעלות.

5.5. ליד מקורות חום אחרים: כבלים אחרים שחוצים את התוואי, צינורות המובילים חום, וביוב. כאשר קובעים את כושר העמסה של הכבל יש למצוא את צוואר הבקבוק שהכי מגביל את העמסה, ע"י דירוג של צווארי הבקבוק התרמים. חלק מההתמודדות עם צווארי הבקבוק הוא למצוא אותם.

## 6. העמסה דינאמית (Transient).

כל מה שנסקר עד כה סוקר את מציאת כושר העמסה במצב מתמיד של הכבל, אולם קיים בתקנים חלק שלם המאפיין את חישובי העמסה הדינאמיים של הכבלים. כלומר את תופעות המעבר, וחישוב העמסה בכל רגע נתון ובמצב חירום (עליית עומס הכבל בזמן תקלה).

## 7. חישובי טמפרטורה בשטח.

כאשר קיים עומס במעגל, טמפרטורת הכבל עולה. העלייה בטמפרטורה ניתנת לקביעה ע"י חישובי העמסה. אולם ניתן גם למצוא את טמפרטורת הכבל במדידה. ע"י שילוב של מדידות אלו עם מודל חישוב העמסה. ניתן לקשר בין תאוריה למציאות.

## 7.1. מדידת טמפרטורה באמצעות תרמוקפל: התרמוקפל זול ובעל טווח טמפרטורות נרחב לביצוע

המדידה. ע"י חיבור התרמוקפל למעטה או לסינוך הכבל (מעבר לכך לא ניתן מכוון שנפגע בבידוד), ניתן לחשב את הטמפרטורות של הכבל בנקודה זו.

דוגמא לשימוש בתרמוקפלים למדידת טמפרטורות היא בדיקת טיפוס למערכת מתח עליון,

במהלכה המערכת עומדת במתח הכפול מהמתח אליו תוכננה לעבוד בשירות, תוך כדי

העברתה 20 מחזורים תרמיים יומיים. המחזור התרמי היומי הינו חימום של 8 שעות

לטמפרטורה של 95-100°C באזור המוליך (5 מעלות מעל מקסימום העמסה לבידוד XLPE

באזור המוליך), וקרור טבעי של 16 שעות. הבקרה על המחזורים התרמיים נעשית על גבי כבל

דמה במקביל לכבל האמיתי וזאת ע"י שימוש בתרמוקפלים. זאת היות ועל הכבל האמיתי יש

העמסה הן של זרם והן של מתח ולכן לא ניתן לחוררו עד המוליך לצורך בקרת הטמפרטורה.



[7] בדיקת טיפוס אופיינית של מערכת 132 קילו וולט.

## 7.2. סיב אופטי בכבל.

הסיב הוא חלק המשתלב בכבל הכוח לכל אורכו. פענוח הטמפרטורה בכל נקודה ונקודה מתבצע ע"י מערכת DTS (Distributed Temperature Sensing), היתרון של שיטה זו שהסיב נמצא לכל אורכו, וכך ניתן לאתר צווארי בקבוק תרמים.

## 8. תוכנה לחישובי העמסה:

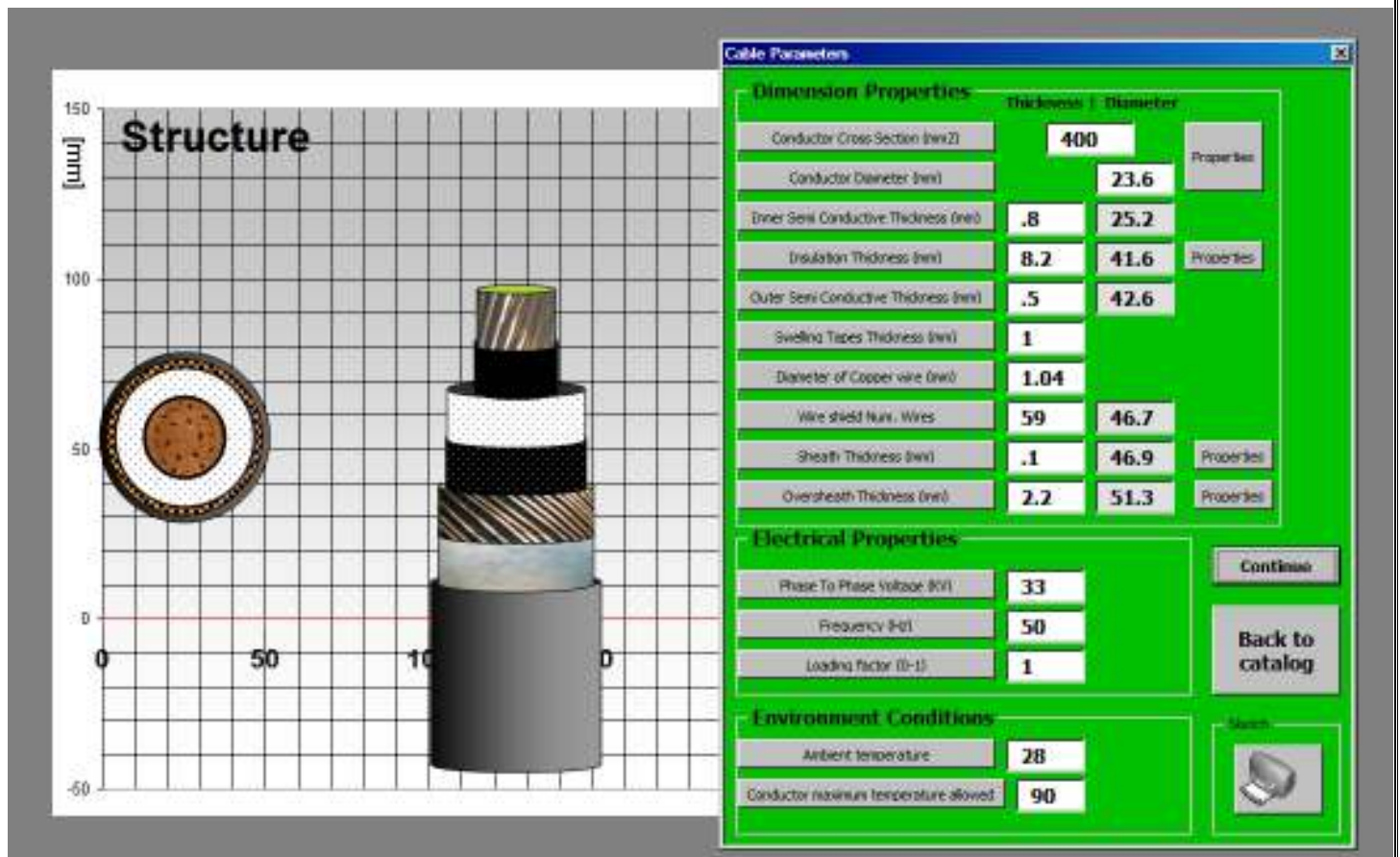
תוכנה הינה כלי שימושי לחישובי העמסה. ע"י קנייה או יצירה של כלי כזה ניתן גם להגיע לחישובי העמסה מסובכים (מספר מעגלים במקביל, יחד עם שיטות הנחה שונות, יחד עם סוגי כבלים שונים...)

כחלק מהרצון להגדיל את ארגז הכלים שברשותי כתבתי תוכנה באקסל "Hand Made" המשלבת בתוכה מאקרו (Visual Basic), התוכנה מאפשרת תכנון כבל, הלוקחת בחשבון את תנאי ההתקנה (עומק התקנה, טמפ' אדמה, התנגדות תרמית אדמה, מספר כבלים, מספר מעגלים, התייבשות הקרקע, שיטת חיבור הכבלים להארקה ועוד) וכן את התכונות של הכבל (מידות גיאומטריות, סוג החומרים (מתכתיים, פלסטיים, סרטים), פרמטרי ייצור ובדיקות מעבדה) ועל סמך זה מחשבת את כושר העמסה של הכבל במצב מתמיד, ובתופעות מעבר. על ידי סימולציה זו אנו מקבלים פרמטרים של כבל אופטימלי, אידיאלי לרשת.

בנוסף, התכנה מבצעת אופטימיזציה של שיטת ההתקנה של הכבל, שגם היא משפיעה על פרמטרי הכבל ובכך על עלותו. אופטימיזצית תצורת ההתקנה כוללת שיטת סידור הכבלים, שיטת חיבורי ההארקות, וסוג האדמה.

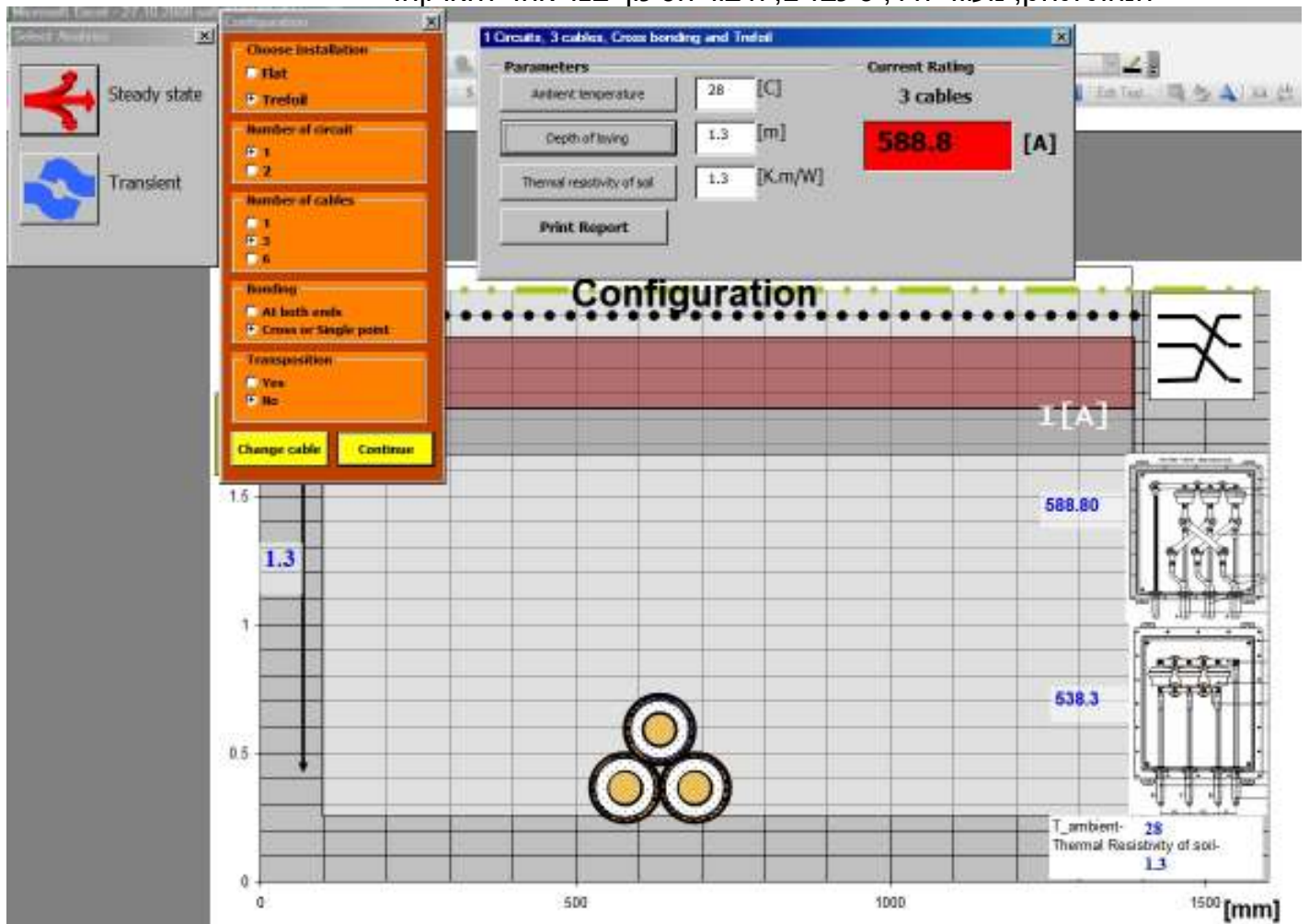
מספר דוגמאות מהתוכנה (בתוכנה כמובן קיים גם המודל הדנאמי שלא נכנסתי אליו כאן):

## 8.1. הכנסת פרמטרים של הכבל:

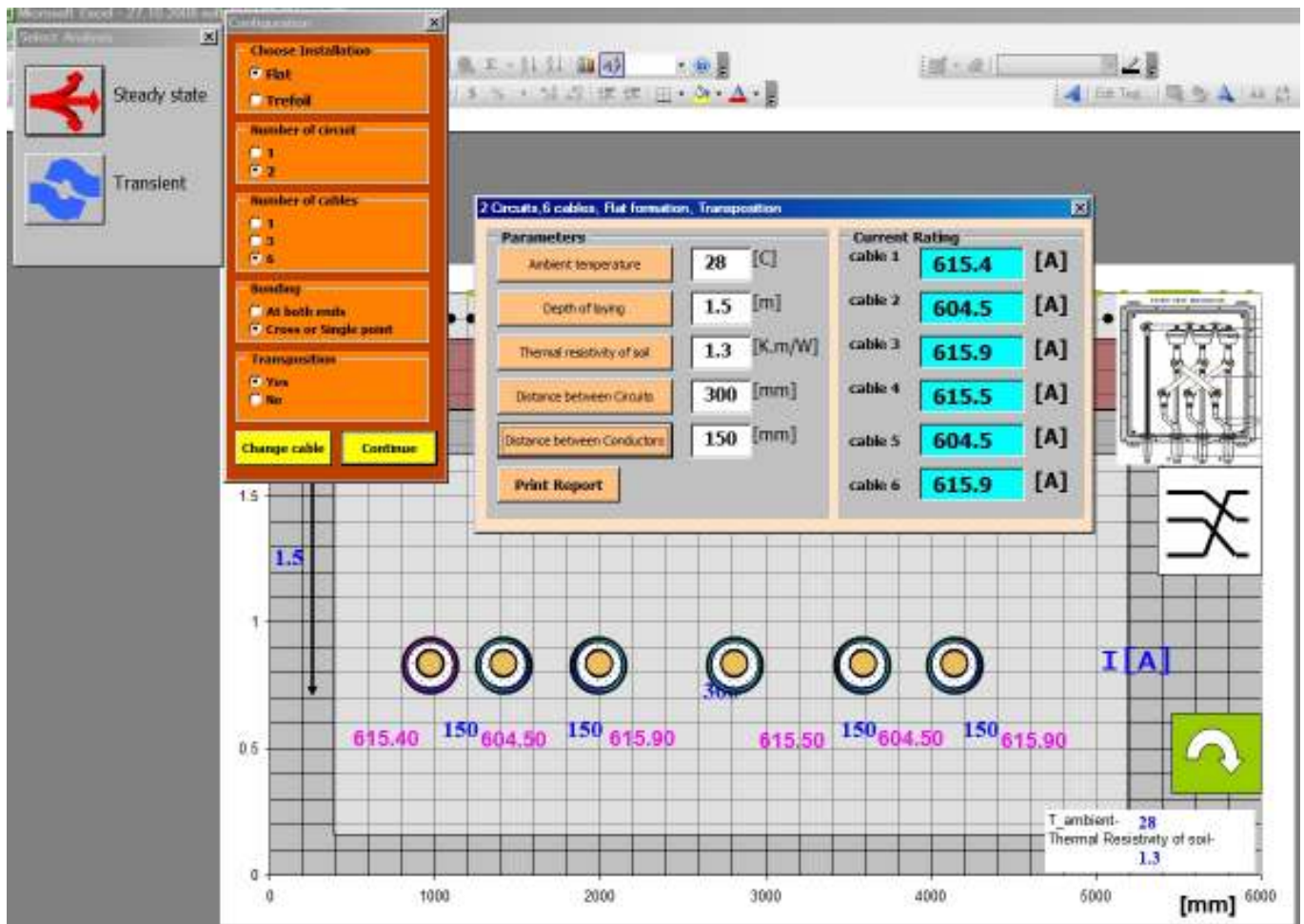


## 8.2. בחירת הפרמטרים לכושר העמסה תרמי במצב מתמיד:

הנחת תלתן, מעגל יחיד, 3 כבלים, חיבור הסינוך בצד אחד להארקה.



8.3. בחירת הפרמטרים לכושר העמסה תרמי במצב מתמיד.  
הנחה שטוחה, 2 מעגלים, 6 כבלים, חיבור הסינור בהצלבה.



9. לסיכום:

במאמר סקרתי את השלבים לחיזוי כושר העמסה של כבל, החל ממקורות החום, ההתנגדויות התרמיות, חישוב כושר העמסה מקסימלי, צווארי הבקבוק, מדידה און ליין של טמפרטורות בכבל, ותוכנות לחיזוי כושר העמסה, מפאת קוצר היריעה לא נכנסתי לנושאים חשובים נוספים כגון השפעת סוג הקרקע, התיבשות הקרקע, חישובים דינאמיים, ועוד. חיזוי העמסה חייבת להיות חלק מארגז הכלים הבסיסי של כל מהנדס חשמל.

10. בבליוגרפיה:

- Power Cable Ampacity (Kema Course).
- IEC 60287-1-1 "Calculation of the Current Rating"- General.
- IEC 60287-1-2 "Calculation of the Current Rating"- Two circuits, Flat Formation.
- IEC 60287-1-3 "Calculation of the Current Rating"- Circulating Currents...
- IEC 60287-2-1 "Calculation of the Current Rating"- Calculation of thermal resistance...
- IEC 60853-1,2,3 "Calculation of the Cyclic and Emergency Current rating of Cables.