ISSN 0793-8152
פברואר • 2017

אחרת

פאזה

מידעון מקצועי לחשמל

חברת החשמל

פרויקט חישמול מסילות רכבת ישראל • תיל הארקה כחלק ממערכת הארקה של רשת מתח גבוה • מזגני אינוורטר • השוואת מחירי חימום חדרים באמצעות מכשירים ומיתקנים שונים • "תמונה אחת שווה אלף מילים"

מה במידעון

3 פרויקט חישמול מסילות רכבת ישראל

6 מזגני אינוורטר

8 תיל הארקה כחלק ממערכת הארקה של רשת מתח גבוה

13 השוואת מחירי חימום חדרים באמצעות מכשירים ומיתקנים שונים

14 "תמונה אחת שווה אלף מילים"

דבר העורך

קוראים יקרים,

בראשית דברי אבקש לברך את המהנדסת סימינה ברטשניידר עם פרישתה לגימלאות, ולהודות לה על תרומתה רבת-השנים לפעילות המחלקה לייעול הצריכה של חברת החשמל, ועל פעילותה במערכת "פאזה אחרת" ותרומתה לה. אני מאחל לה בריאות טובה והצלחה בהמשך דרכה.

גם הפעם, כמדי שנה, אנו מפרסמים מאמר שכתבה סימינה בנושא השוואת מחירי חימום חדרים באמצעות מכשירים ומיתקנים שונים (המופעלים באמצעות דלקים או חשמל). כתמיד, מזגן האוויר במחזור חימום הוא המכשיר החסכוני ביותר מבין מכשירי החימום.

נחיצותו של תיל הארקה ברשת מתח גבוה עילית היא סוגיה שנוגעת במעגלים נרחבים של העוסקים בתכנון, בביצוע, בהפעלה ובאחזקה של רשת מתח גבוה. לפיכך, אנו מפרסמים מאמר בנושא זה, אשר מציג את חשיבותו של תיל הארקה, וסוקר את היתרונות ואת החסרונות שיוצרת התקנתו ברשת מתח גבוה עילית.

לאחרונה אנו עדים לשימוש ההולך וגובר במזגני אינוורטר, גם כחלק מפעילות לייעול צריכת האנרגיה למיזוג אוויר. מאמר בנושא זה מציג את מהות ההבדלים בין פעולת המזגן "הרגיל" (ON/OFF) לבין זו של מזגן האינוורטר, ואת היתרונות הגלומים בשימוש במזגני האינוורטר.

מדינת ישראל עומדת בפני מהפכה ופיתוח תשתיות מרחיק לכת של רכבת ישראל, בדמות חישמול מסילות רכבת ישראל. זהו פרויקט אשר מציב אתגרים רבים לעוסקים בחשמל, ועל כך - כתבה בגיליון.

כמדי גיליון, גם בגיליון זה אנו מפרסמים במדור הקבוע "תמונה אחת שווה 1,000 מילים" דוגמאות של ליקויי בטיחות בחשמל. אנו חוזרים ומזמינים את קהל הקוראים לשלוח למערכת "פאזה אחרת" תמונות של מיפגעים חשמליים, ואנו נשקול את פרסומן.

לסיום אבקש ליידע את העוסקים בחשמל בדבר סיום פעילותה של ועדת הפירושים, שמשך שנים רבות פירסמנו, בכל גיליון, פסיקות נבחרות שלה. לאחרונה הודיע מנהל ענייני החשמל על סיום פעילותן של ועדת ההוראות וועדת הפירושים, ועקב כך גם אנו נאלצים להפסיק פעילות זו, ולא נצרף חוברת פסיקות של הוועדה. קהל העוסקים בחשמל יכול להמשיך ולפנות בכל שאלה אל מנהל ענייני החשמל ברשות החשמל.

קריאה נעימה ומועילה.

העורך,

שלומי לוי

המערכת

עורך: שלומי לוי
מערכת: ד"ר נולדי גרינברג, משה שפיגל
מינהלה והוצאה לאור: יצחק עקיבא
הדפסה: דפוס המאירי
איור שער האחורי: אנדי צ'אושו
תמונת השער: רכבת ישראל
עיצוב גראפי והפקה: מרק בלייוייס, תקשורת שירותית

כתובת המערכת:
מערכת "פאזה אחרת" חברת החשמל, ת"ד 10, חיפה 3100001
טל' 04-8182681. פקס: 04-8182687
e-mail: faza-aheret@iec.co.il
קוד זיהוי: "פאזה אחרת" פברואר 2017 -081
פאזה אחרת באינטרנט: באתר חברת החשמל
www.iec.co.il

כל הזכויות שמורות לחברת החשמל. אין לצטט קטעים מתוך כתב העת ללא אישור בכתב של מערכת "פאזה אחרת".

סרקו את הקוד והכנסו לחוברות פאזה אחרת באתר חברת החשמל

>>> אריאל גוטקינד
>>> שחר פישר

פרויקט חישמול מסילות רכבת ישראל

ברכבת ישראל מתחוללים בתקופה האחרונה שינויים טכנולוגיים ומבוצע פיתוח תשתיות מרחיק לכת. יש האומרים ששינויים אלו עולים על הדמיון של זקני הרכבת. ניתן לחזק את הדברים באמצעות מספר הנסיעות היומיות והשנתיות ברכבת ישראל: בתשעת החודשים האחרונים של שנת 2016 בוצעו ברכבת ישראל כ-44.7 מיליון נסיעות, לעומת 38.6 מיליוני נסיעות בתקופה המקבילה ב-2015 - גידול של כ-16%. בנוסף, ממוצע הנסיעות היומי עמד ב-2016 על כ-218,000 נסיעות ביממה, גידול של כ-10% בהשוואה ל-198,000 נסיעות ב-2015. עלייה בביקושים נרשמה במרבית קווי הרכבת, הן הוותיקים והן החדשים. בחודש אוגוסט נרשמו כ-255,000 נסיעות ליום, שיא נסיעות יומי של כל הזמנים.

מגמה זו, על פי כל התחזיות, רק תלך ותגבר, ועל כן יש להכין את תשתית הרכבת לקליטה של נוסעים נוספים.

רקע

לפעמים נדמה שהנחת מסילת ברזל היא יצירת קווים מקבילים שלכאורה אינם נפגשים, אך האמת היא שהנחת מסילת ברזל היא רק הרובד העליון במבנה הנדסי חוצה-תחומים, כגון הנדסה אזרחית, תקשורת ואלקטרוניקה, חשמל, תוכנה, ועוד תחומים רבים שאינם נראים במבט ראשון. פרויקט חישמול מסילות רכבת ישראל הוא פרויקט רב-תחומי ונדיר בגודלו ביחס לפרויקטים שהוקמו עד כה בישראל. גודלו נתון בשני מישורים - פריסתו על פני 420 קילומטרים של מסילות מחושמלות, ותיקצובו. נוסף על כך, שינויים בטכנולוגיה מחייבים שינוי בתפעול הרכבת ובאחזקתה, שכן הוספת אלמנטים, ובמיוחד אלמנטים חשמליים, מחייבת משנה זהירות ותורת הפעלה ואחזקה שונה לחלוטין מזו הנהוגה כיום.

במאמר זה ננסה לתמצת את המרכיבים השונים שכולל פרויקט זה, בתחום ההנדסי בכלל ובתחום החשמל בפרט.

פרויקט החישמול פועל במסגרת תוכנית תשתיות לאומיות (תת"ל 18). תוכנית זו נועדה לאפשר לרכבת ישראל להפעיל את מערך הרכבת הארצי באמצעות חישמול עילי, כתחליף להנעת קטרים בדיזל. התוכנית נועדה להקים את מערכת הולכת החשמל החדשה. להנעה חשמלית יתרונות רבים על פני הנעה בדיזל, הן בהיבט התפעולי של הרכבת והן בהיבט של שיפור מסוים באמינות ובתנאי השירות לנוסעים בתחבורה הציבורית, ומשום כך, ברוב מדינות העולם מונעות הרכבות באמצעות מערכות חשמליות.

יתרונות ההנעה בחישמול הם אלה:

- קיצור משך זמן הנסיעה בשל יכולת הקטר החשמלי לקצר את משך ההאטה וההאצה, ובשל יכולתו לפתח מהירות מְרַבִּית גבוהה מזו של קטרי דיזל.
- התייעלות המערכת באמצעות העברת יותר רכבות במערכת המסילות בזכות קיצור זמני ההאטה וההאצה, ושליטה טובה יותר בזמני הנסיעה. בצוואר הבקבוק (בעיקר לאורך נחל איילון בתל אביב) יתאפשר ניצול יעיל יותר של המסילות, אשר פוקקות כיום את המערכת כולה.
- שיפור בדיוק ובעמידה בלוחות זמנים.
- אפשרות הקמת קווים חדשים באזורים בעלי טופוגרפיה הררית שבהם קטרי הדיזל אינם יכולים לשאת את הקרונות, למשל בקו המהיר לירושלים ובקו עכו-כרמיאל. יודגש, כי ללא מערך חישמול, אי-אפשר יהיה להקים קווים אלה.
- שיפור תנאי ההמתנה בתחנות בזכות הקטנת מיפגעי רעש הנגרמים בתהליך ההאטה וההאצה, וצמצום פליטות מזהמי אוויר ומטרדי ריח.

בטרם נבחרה טכנולוגיית החישמול העילי, נבחנו לעומק גם טכנולוגיות אחרות:

- חלופת הולכה באמצעות פס שלישי. זו טכנולוגיה מיושנת שכרוכה בה סכנת חישמול. הרכבות נחותות בהרבה מהחלופה המועדפת, הן באמינותן והן במהירותן.
- חלופת הנעה באמצעות חומרי דלק פחותי-זיהום. פתרון זה מונע רק את זיהום האוויר. יתרונותיה האחרים של מערכת החישמול העילית, כגון אמינות, מהירות, גמישות, חיסכון כלכלי וסבירות טכנולוגית מוכחת - אינם באים לידי ביטוי בשיטה זו.
- חלופת ריחוף מגנטי. זהו פתרון עבור רכבות מהירות הכרוך בהחלפת התשתיות בתשתיות חדשות, יקרות מאוד. טכנולוגיה זו היא עדיין בשלב ניסיוני בעולם כולו, וטרם נצבר המידע הדרוש להצדקת השימוש בה.
- חלופה משולבת של דיזל וחישמול. חלופה זו תאפשר הימנעות מהקמת מערכת חישמול עילית באזורים רגישים. תפעולה נמצא לא-יעיל, יקר ומסובך.
- חלופות טכנולוגיות נוספות, כגון תאי דלק, רכבת חשמלית נטענת ואחרות.
- נבחנו גם חלופות חדשות וניסיוניות, אך בשלב הפיתוח הנוכחי שלהן מדובר במערכת לא יעילה ויקר, והשלמת הפיתוח צפויה רק בעוד שנים רבות.

על מנת לאפשר את המעבר מְקָטרים המונעים בדיזל להנעה חשמלית מציעה התוכנית להקים מערכת חישמול תומכת לאורך מסילות הרכבת, המתבססת על האלמנטים הבאים:

- עמודי רשת מגע עילית לאורך 420 הקילומטרים של המסילה.
- 14 תחנות השנאה לאורך הצירים המחושמלים, במרחקים של כ-40 קילומטרים ביניהן בשלב ראשון, והקמת תחנות שנאים עצמאיות לקווים מהירים עבור הקו המהיר העתידי.

אריאל גוטקינד - מהנדס חשמל, מנהל רשת מגע עילי (OCS), רכבת ישראל
שחר פישר - מהנדס חשמל, מנהל אספקת אנרגיה ותחנות השנאה (TS), רכבת ישראל

בצד יתרונות ההנעה החשמלית ישנם גם חסרונות, שהבולט בהם הוא חשש מקרינה אלקטרומגנטית. בעולם כולו טרם נקבע כי לקרינה זו יש השפעות בריאותיות, אך גם טרם הוכח שאין לה השפעות במובן זה. לכן הוחלט להשתמש כאן בעקרון "הזהירות המונעת", ולשם כך אומץ התקן השווייצרי, שהוא התקן המחמיר ביותר הקיים בעולם בנושא זה, אשר קובע כי הקרינה לא תעלה על 10 מיליגאוס.

בתוכנית ננקטה הקפדה חמורה עוד יותר בביצוע האמור בתקן זה – באמצעות הטמעת מירווחי ביטחון רבים (המסומנים בתוכנית כמגבלות בנייה ופיתוח ברוחב של עד 10 מטרים), וכן שימוש במודלים מחמירים לחיזוי קרינה. על פי מודלים שבוצעו, הקרינה לא תעלה על 6 מיליגאוס בקווים העמוסים ביותר, והיא תהיה 3-4 מיליגאוס בקווים העמוסים פחות.

חשוב לציין כי לשם חישמול הרכבת העניק המשרד להגנת הסביבה "היתר סוג" למיתקניה המחושמלים.

מערך החישמול הרכבתי

ניתן לחלק את מערך החישמול הרכבתי לשלושה תחומים עיקריים: רשת המגע העילית, תחנות ההשנאה הרכבתיות, ומערך השליטה והבקרה הארצית.

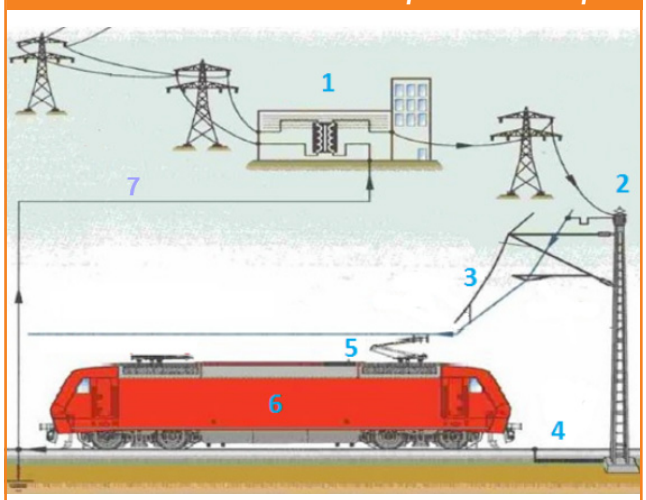
רשת המגע העילית – Overhead Contact System (OCS)

רשת החשמל העילית, שתתפרס על פני מסילה באורך 420 קילומטרים, ובאורך כולל של יותר מ-1,200 קילומטרים, תכלול למעלה מ-30,000 עמודי רשת ועוד עשרות אלפי פריטי רשת נוספים. הרשת אמורה להעביר אנרגיה לקטר החשמלי תוך כדי תנועתו אל עבר היעד. רשת זו היא ייחודית, ומשרתת את צורכי הרכבת בלבד. באיור 1 מתואר מערך העברת האנרגיה החשמלית מנקודת הזינה ועד הקטר החשמלי.

הרשת הרכבתית בנויה מתיל נושא ותיל מגע, במתח רשת של 25 קילו-וולט חד-מופעי המוזן ישירות מתחנת השנאה רכבתית (ראו הסבר בהמשך). כמתואר באיור 2, תיל המגע נישא על גבי התיל הנושא באמצעות מקשרים (Droppers), שתפקידם לייצב אותו במקביל למסילה.

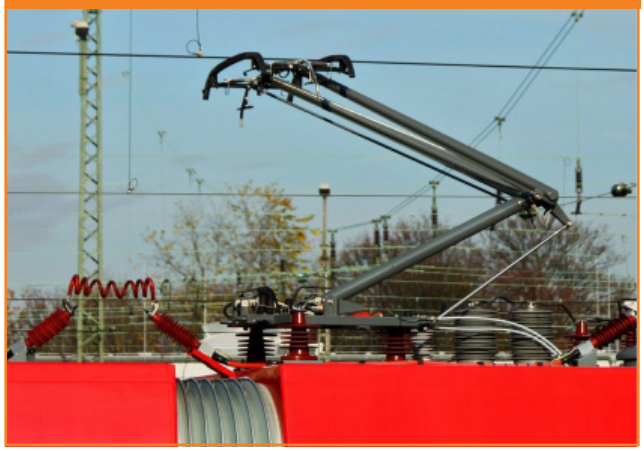
יש לציין, שרשת החשמל הרכבתי נמצאת במגע מתמיד עם רכיב המותקן על גג הקטר, הנקרא זרוע מגע לקטר חשמלי (פנטוגרף),

איור 1: תרשים עקרוני של מערך העברת האנרגיה החשמלית מנקודת הזינה ועד הקטר החשמלי



1. תחנת השנאה רכבתית 2. רשת מגע רכבתי כולל זרועות
3. תיל נושא ותיל מגע 4. הארקה 5. זרוע מגע לקטר חשמלי
6. קטר חשמלי 7. מערכת החזרת הזרם

איור 2: הפנטוגרף – זרוע מגע של הקטר החשמלי



ותפקידו להעביר את האנרגיה מרשת החשמל אל הקטר החשמלי המניע את גלגלי הקטר (איור 2).

בעת נסיעת הרכבת חייב מגע הזרוע הנמצאת על גג הקטר החשמלי ברשת העילית להיות אחיד ככל הניתן, ללא נקודות "קשות" למגע. מסיבה זו אסור להשתמש במחברים (מופות) ברשת החשמל הרכבתית, ובסיומו של קטע רשת (אלמנט מתיחה), ובתחילתו של אחר, מבוצע מעבר הנקרא Over Lap, שמשמעו חיבור שני קטעי רשת במקביל. אורכו של כל קטע רשת הוא בערך 1.2 קילומטרים, והוא תלוי בתוואי המסילה ובאורך התיל המסופק, ואילו אורכו של הקטע הנמצא במקביל הוא 150-250 מטרים.

מבנה הרשת והעמודים

תפקידם של עמודי רשת המגע העילית הוא לשאת את העומס המכאני של רשת המגע העילית. כפי שצוין לעיל, רשת זו נמצאת במגע מתמיד עם זרוע המגע שעל גג הקטר, ומשום כך, מערך הזרועות המותקנות על גבי העמודים חייב להיות בעל גמישות מסוימת כלפי הכוחות הדינמיים המופעלים על זרועות אלו.

ניתן למצוא עמודי רשת רכבתית מסוגים שונים, כגון עמודי מסבך (דיאגונלים), בטון, ברזל מגולוון בצורת צינור או H. על גבי עמודים אלו תותקן מערכת זרועות הנקראת Cantilever.
חשוב לציין שמערך הזרועות שעל גבי העמודים לא רק נושא עליו עומס מכאני; הוא גם נמצא תחת מתח מתמיד של 25kV, ובשל כך יש צורך לבודד את העמוד מהמתח. בידוד זה נעשה באמצעות מבודדים בעלי אורך של 600mm הנמצאים בתוך שבין העמוד לבין הזרוע (כמתואר באיור 3). יתרה מזאת, העמוד מוארק לקרקע באמצעות מוליך ואלקטרודת הארקה מקומית, בנוסף ליסוד.

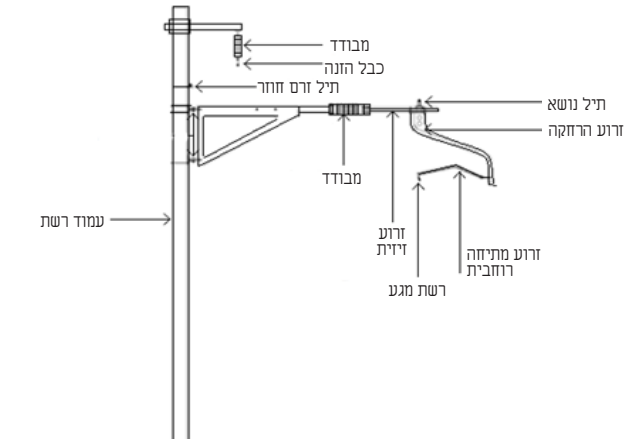
מתיחת הרשת

רשת החשמל הרכבתית התלויה על העמודים מתוחה בכל מקטע שלה בשני כיוונים לאורך ולרוחב.

מתיחה לאורך – מתיחת הרשת לאורכה מחויבת על מנת להקטין ככל האפשר את שיקוע הרשת, ולשמור על מקבילות ועל גובה קבועים ביחס למסילה. גובה רשת המגע (החלק הנמוך ביותר) יכול לנוע בטווח של 5.1m-6m ביחס לגובה המסילה. מתיחת הרשת נעשית באמצעות משקולות על גבי העמודים, השומרים על מתיחה קבועה.

מתיחה לרוחב – מתיחת הרשת לרוחב שונה בתכלית מהמתיחה לאורך, ותפקידה ליצור רשת הפרוסה בצורת זיגזג על פני רוחב המסילה. צורה זו של הרשת מונעת שחיקה מוגברת של זרוע המגע.

איור 3: רשת המגע העילית



תחנות השנאה רכבתיות (תה"רים)

תפקידן של תחנות ההשנאה הרכבתיות Traction Substation (TS) הוא להוריד את מתח ההזנה ממתח עליון (161 קילו-וולט ממקטע המסירה של חברת החשמל) למתח הרשת הרכבתית (25 קילו-וולט). תחנות ההשנאה הרכבתיות כוללות מערכות פיקוד, הגנות, בקרה, שליטה מקומית ושליטה מרחוק (Telecontrol). מיקומן נקבע בקרבת מערך המסילות ככל הניתן, לשם הזנת רשת החישמול העילית. התחנות נפרסות לאורכה ולרוחבה של רשת המסילות על מנת לאפשר ביזור של מקורות האנרגיה ולשמור על רמות המתח הנדרשות להפעלה. המרחק האופייני שבין תחנות ההשנאה הרכבתיות הוא בסביבות 20-40 קילומטרים.

בין שתי תחנות ההשנאה הרכבתיות לא מתקיים קשר חשמלי בגלל הפרש פאזות, והן מופרדות באמצעות איזור נייטרלי (Neutral Zone). איזור חיץ זה משמש כמבודד בעבודה רגילה, אך ניתן לקצרו בעת תקלה לשם הזנה מתחנת השנאה סמוכה בעלת יכולת גיבוי. במקרה של תקלה, איזור נייטרלי זה מחויב בהפעלה תקינה, שאם לא כן, משמעותו קצר גלווני בין שתי תחנות השנאה (איור 4).

הרשת החשמלית תהיה מוגנת בעיקר באמצעות ממסרי הגנת מרחק למתח גבוה על מנת להבדיל בין זרמי קצר לזרמי עבודה, מפני שזרמי הקצר הרחוקים מתחנות ההשנאה הרכבתיות אף קטנים מזרמי העבודה.

החזרת הזרם אל תחנות ההשנאה הרכבתיות נעשית במספר אמצעים:

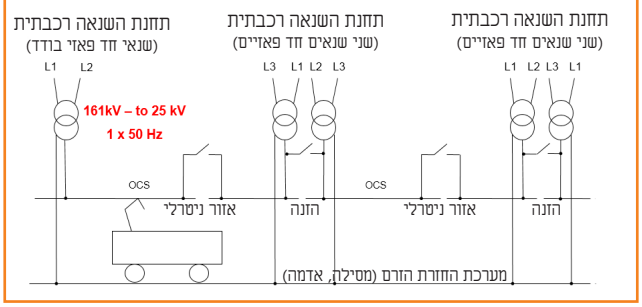
- מסילות הברזל כמוליך העיקרי
- תיל מוליך חוזר על גבי עמודי הרשת הרכבתית
- דרך האדמה

המערך החשמלי של תחנת השנאה רכבתית כולל את הרכיבים העיקרים הבאים:

- שנאים גדולים (שנ"גים) רכבתיים למתח עליון, 161kV/27.5kV בהספק של 2x30MVA / 2x45MVA
- מסדר מתח עליון סגור מבודד בגז SF6 בעל מתח נומינלי 161kV מטיפוס Encapsulated GIS
- לוח מתח גבוה חד-פאזי למתח נומינלי 25kV להזנת מערכת הולכה החישמול
- 4-6 קווי הזנה (הזרקה) תת-קרקעיים לרשת עילית ולמתחמים
- ממסרי הגנה ורכיבי Inteligent Electronic Device (IED)
- מערכות מנייה ומדידת אנרגיה
- מערכת פנימית לשליטה ובקרה לתחנות ההשנאה הרכבתיות
- לוחות במתח נמוך
- מערכות גיבוי וגנרציה במצב חירום (גנרטור, מצברים, אל-פסק וכיו"ב)

באיור 4 מוצג לדוגמא תרשים של מערכת הזנת החשמל לרכבת, הכולל את תחנות ההשנאה, השנאים הרכבתיים, וקווי רשת המגע העילית.

איור 4: תרשים עקרוני של מערכת הזנת החשמל לרכבת



השנאים הרכבתיים

השנאים הרכבתים הם שנאים תלת-פאזיים מצד המתח העליון, אך בשונה משנאי סטנדרטי, הם מחוברים רק לשתי פאזות מרשת המסירה בצד 161kV עם אפשרות להחליף תמיד פאזות לצורכי איזון ברשת. מצד המתח הגבוה, השנאי הוא דו-פאזי, כאשר הדק אחד מזין במתח של 25kV חד-פאזי, והדק שני מהווה חיבור לזרמים החוזרים.

שנאים אלו יכולים להעביר אנרגיה בהספקים גבוהים מאוד למשך זמן קצר יחסית, ובהתאם למשטר התפעול של הרכבות בשעות העומס בבוקר ובערב.

כל השנאים עומדים בתקן הרכבתי EN 50329, ונבחרו לעמידות עומס ב-CLASS VI.

מערכת שליטה ובקרה ארצית

עבור המערכת המחושמלת הארצית נבנה מרכז בקרה ארצי המכיל מערכת פנימית Supervisory Control And Data Acquisition (TS SCADA) לצורך פיקוח, שליטה בקרה ואיסוף נתונים. לשם ביצוע הניטור, יש לאסוף נתונים על מצבה התפעולי של רשת החישמול באמצעות רכיבים המותקנים ברשת המחושמלת, כך שתתקבל תמונה עדכנית של רשת החישמול על כל רכיביה בזמן אמת.

העברת הנתונים אל מערכת הבקרה הארצית מבוצעת באמצעות ציוד שליטה מרחוק Telecontrol הממוקם לאורך המסילה ובתחנות ההשנאה הרכבתיות.

מערכות השליטה והבקרה בכלל, וברכבת ישראל בפרט, מחויבות במיגון בפני מתקפות סייבר מצד גורמים שונים, ורכבת ישראל משקיעה מאמצים ומשאבים רבים בנושא זה על מנת להגיע להגנה מרבית.

סיכום

במאמר זה הצגנו בקווים כלליים את פרויקט החישמול של רכבת ישראל. נכון לימים אלו שוקדת רכבת ישראל על תכנונים עתידיים לקראת 2030 ואף 2040.

נכון וחשוב לרכבת ישראל לפתח את מערך המסילות והקווים המחושמלים כך שכל אחד ואחת מאיתנו יזכה לתחבורה ציבורית ראויה וקרוב ככל האפשר לביתו, כמנוף לצמיחה של המשק כולו. לאור עליית כמות הנסועה בכלי רכב פרטיים, אין ספק שרכבת ישראל מהווה את שלד היסוד של התחבורה הציבורית הבין-עירונית בישראל, והיא נועדה בעיקר ליצור חיבור יעיל ומהיר בין המטרופולינים.

מזגני אינוורטר

מזגני אינוורטר עיליים נעשו לאחרונה נפוצים יותר בזכות הורדת מחירם, מצד אחד, ועלייה באמינותם, מצד אחר. במאמר זה נציג כיצד פועל מזגן אינוורטר לעומת מזגן ON/OFF רגיל, ונציג את היתרונות והחסרונות של מזגני האינוורטר, וכן המלצות לבחירה נכונה של מזגן אינוורטר חסכוני ויעיל מבחינה אנרגטית.

מערכת מיזוג אוויר היא מערכת שמטרתה שיפור בנוחות האקלימית של חלל ממוזג כלשהו, ותפקידו של המזגן הוא להעביר אנרגיה בצורה של חום מחלל מסוים לחלל אחר באמצעות ניצול כמה עקרונות בתרמודינמיקה, שלפיהם מושקעת אנרגיה בהרתחת נוזל והפיכתו לגז, ומשתחררת אנרגיה באמצעות עיבוי גז והפיכתו לנוזל.

מערכת מיזוג מפוצלת מורכבת משתי יחידות: יחידה פנימית הנקראת מאייד, וכוללת מאוורר ומחליף חום ועוד כמה רכיבים, ויחידה חיצונית הנקראת מעבה, שגם היא כוללת מחליף חום ומאוורר. היחידות מחוברות באמצעות צנרת גז (קרר) וכבל חשמלי. המדחס, שנמצא ביחידה החיצונית, הוא צרכן החשמל העיקרי, והוא המנוע של המערכת והאחראי על זרימת הקרר בין היחידות שמאפשרת את פעולת המיזוג.

בקיץ אנו צורכים חשמל להסעת האנרגיה (בצורה של חום) מהחלל הממוזג (המשרד, חדר שינה) אל החלל החיצוני, ובחורף - להיפך: אנו צורכים חשמל לשם הסעת אנרגיה מהחלל החיצוני אל החלל הפנימי.

מקדם יעילות COP - Coefficient of Performance

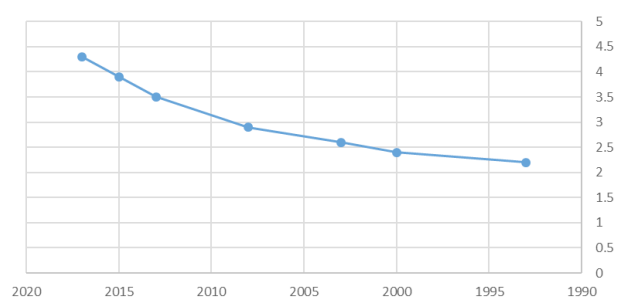
מה גורם לכך שמזגן הוא אמצעי חימום וקירור זול, חסכוני ויעיל מבחינה אנרגטית? הסיבה לכך היא זו: מזגן אינו מכשיר שממיר אנרגיה חשמלית לאנרגיית חום, דוגמת תנור חשמלי, אלא סוג של משאבת חום. האנרגיה החשמלית שאנו משקיעים בפעולת המזגן מצליחה להסיע/לשאוב אנרגיה (חום) פי 4 כמעט מהאנרגיה החשמלית שמושקעת. זאת, להבדיל מתנור חימום או רדיאטור, שם מושקעת כמות מסוימת של אנרגיה חשמלית, ומתקבלת כמעט אותה אנרגיה בצורה של חום, אפילו קצת פחות. מאחר שמדובר על נצילות מעל 100%, אנו מגדירים את מקדם היעילות המזגן במונח חסר יחידות - C.O.P - אשר מבטא את היחס בין התפוקה של המזגן בוואטים לבין ההספק החשמלי הנצרך גם הוא בוואטים.

$$COP = \frac{Power\ output\ [W]}{Power\ input\ [W]}$$

ככל שמקדם היעילות גדול יותר, המזגן יעיל יותר. כלומר, עבור אותה צריכת חשמל אנו מקבלים תפוקת חימום או קירור גדולה יותר. לשם השוואה, מקדם היעילות של תנור חימום הוא 0.95, ואילו זה של מזגן אוויר הוא 4 לערך.

באיור 1 מוצג גרף המתאר את העלייה במקדם היעילות במשך השנים כתוצאה מהתפתחות הטכנולוגיה של מערכות מיזוג האוויר. מחליפי החום הפכו להיות יעילים יותר, סוגי הקרר השתפרו, טכנולוגיית הדחיסה התקדמה ועוד.

איור 1: שיפור בערכי מקדם יעילות המזגן במשך השנים



דירוג אנרגטי של מזגנים

על מנת להקל על קהל המשתמשים, כך שלא יהיה עליהם לבדוק את מקדם היעילות, על כל מזגן תמצאו תווית אנרגיה הכוללת אותיות לועזיות בצבעים מאדום עד ירוק, עבור ערכי COP שונים, כך שהאות A מסמלת את הדירוג האנרגטי היעיל ביותר (בצבע ירוק), והאות G מסמלת את הדירוג הכי פחות יעיל אנרגטית (בצבע אדום). בטבלה 1 מתוארים ערכי מקדמי היעילות COP והאותיות המבטאות את הדירוג האנרגטי בהתאם.

טבלה 1: דירוג אנרגטי של מזגנים (מתוך תקנות מקורות אנרגיה)

סוג המזגן	A	B	C	D	E	F	G
מזגן מפוצל	3.80	3.75	3.70	3.65	3.60	3.55	3.50
מיני-מרכזי	3.60	3.55	3.50	3.45	3.40	3.30	3.20

תפוקת הקירור ותפוקת החימום של המזגן

תפוקת המזגן היא עוצמת הקירור והחימום שהמזגן יכול לספק בשעה (Heating capacity and Cooling capacity). היא מוגדרת ככמות האנרגיה שנוספה או נגרעה מהחלל הממוזג במשך שעת עבודה אחת. ניתן לבטא את תפוקת המזגן ביחידות של ואט חשמלי, אך מקובל לבטא אותה גם ביחידות הספק בריטיות BTU/h. היחס ביניהם הוא מקדם 3.412, כלומר 1 watt = 3.412 BTU/h. רבים נוטים עדיין להשתמש במונח "כוח סוס" כמדד לתיאור עוצמת המזגן ותפוקתו, אך זהו מונח עממי ולא מדויק לתיאור תפוקת המזגן: בדרך כלל מתכוונים לכך שכל כוח סוס 1 שווה לתפוקה של 9,000 BTU/h בערך.

צריכת החשמל של המזגן

יש לשם לב לכך, שיש הבדל בין הספק המזגן בוואט, המתאר את התפוקה התֶרמית שלו, לבין ההספק החשמלי הנצרך שלו, שגם הוא מבוטא בוואט. לדוגמא, בטבלה 2 מוצגים נתונים טכניים של מזגן בעל תפוקת חימום של 10,030 BTU/h, והוא בעל מקדם יעילות C.O.P=3.53. על מנת לחשב את צריכת החשמל של מזגן נתרגם את התפוקה שלו מיחידות 10,030 BTU/h ליחידות בוואטים באמצעות חילוק ב-3.412 ונקבל 2,941 ואט כתפוקת חימום תֶרמית. על מנת לקבל צריכה חשמלית נחלק את התפוקה התֶרמית (ביחידות ואטים) במקדם היעילות C.O.P=3.53, ונקבל כ-833 ואט הספק חשמלי נצרך.

התנהגות מזגני ON/OFF רגילים

במזגן רגיל יש שני מצבים: או שהמדחס פועל בשיא העוצמה שלו (מצב ON) או שהוא אינו פועל כלל (מצב OFF). במצב קירור, כשהמדחס במצב ON, הוא שואב את החום מהאוויר בחלל הפנימי, וכך הוא מקרר אותו. הטמפרטורה מתחילה לרדת עד שחיישן הטמפרטורה הנמצא במאייד מזהה שהטמפרטורה הגיעה סביב הטמפרטורה הרצויה שקבע המשתמש, ואז נותן הוראה להפסיק את פעולת המדחס. המזגן נשאר במצב OFF עד שהחיישן במאייד מזהה שהטמפרטורה בחלל הממוזג עלתה,

טבלה 2: נתונים טכניים לדוגמא של מזגן ON/OFF

תפוקת קירור	BTU/h	10200
	W	3000
תפוקת חימום	BTU/h	10030
	W	2940
הספק נצרך	בקירור W	790
	חימום W	840
מקדם יעילות	קירור COP	3.82
	חימום COP	3.53
דירוג אנרגטי	A-G	A

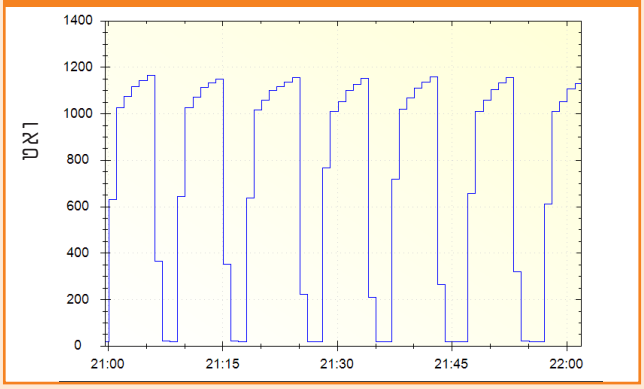
ואז הוא שוב נותן הוראה להפעיל את המדחס, וחוזר חלילה. במצב חימום המצב הפוך: כשהמדחס פועל, הוא מחמם את החלל הפנימי, וכשטמפרטורה מגיעה סביב הטמפרטורה הרצויה, פעולתו נפסקת. יש לשים לב, שבשני המצבים של המדחס, המאוורר במאייד (המאוורר בחלקו הפנימי של המזגן) פועל באופן רציף, והפעולה שלו כלל אינה מעידה על פעולה או אי-פעולה של המדחס.

איור מספר 2 מציג את צריכת החשמל של מזגן ON/OFF (מהדוגמא לעיל), למשך שעה במצב חימום. ניתן לראות שהצריכה הרגעית שלו מגיעה לכ-1,200 ואט. כמו כן אפשר לזהות בבירור את ההפסקות בפעולת המדחס מדי פעם: במקרה שלנו, המדחס הפסיק לעבוד 6 פעמים, וכל הפסקה הייתה בת 3 דקות; כלומר, בסך הכל פעל המדחס כ-42 דקות בלבד מתוך שעה שלמה, כלומר 0.7 מהזמן. משום כך, לגבי שעה זו ניתן לומר שהוא צרך 1,200 x 0.7, שהם 840 ואט. לפיכך, הנתון שעל תווית המזגן (840 ואט, כמוצג בטבלה 2) **מציג את ההספק החשמלי הממוצע בשעה עבודה.**

התנהגות מזגני אינוורטר

מזגן אינוורטר פועל בצורה אחרת. למדחס יש תפוקה משתנה: מצד אחד הוא פועל באופן רציף (רוב הזמן), ומצד אחר ביכולתו

איור 2: גרף צריכה של מזגן ON/OFF במצב חימום בשעה אחת



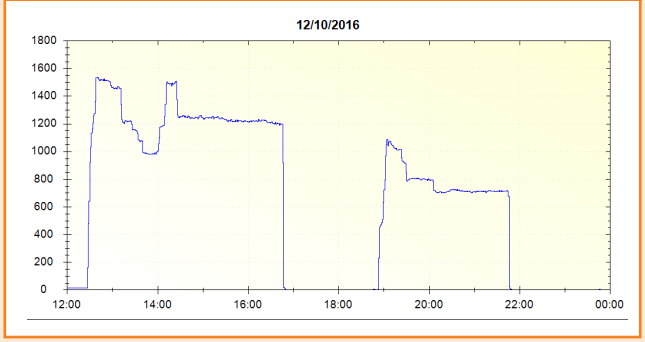
לשנות את עוצמת המיזוג בהתאם לדרישה בחלל הממוזג. אם נעיין בנתונים הטכניים של מזגן אינוורטר, נמצא תחום תפוקות קירור/חימום שהוא יכול לספק (ערך תפוקה תחתון וערך תפוקה עליון, וגם ערך נוסף שנקרא תפוקה נומינלית). טבלה 3 מציגה לדוגמא נתונים טכניים של מזגן אינוורטר מתוך קטלוג של אחד היצרנים. כמתואר בטבלה, התפוקה הנומינלית של המזגן היא 9,550 BTU/h וטווח התפוקות שמסוגל לספק הוא בתחום שבין 3,412 ל-11,600 BTU/h.

טבלה 3: נתונים טכניים של מזגן אינוורטר

תפוקת קירור נומינאלי (min-max)	BTU/h	9550 (3412 - 11600)
	W	2800 (1000 - 3400)
תפוקת חימום נומינאלי (min-max)	BTU/h	9929 (2047 - 12965)
	W	2910 (600-3800)
הספק נצרך	בקירור W	650 (200 - 1200)
	חימום W	700 (160 - 1250)
מקדם יעילות	קירור COP	4.3
	חימום COP	4.15
דירוג אנרגטי	A-G	A

למעשה, מזגן אינוורטר מתחיל את פעולתו בשיא העוצמה, המגיעה בחלק מהמזגנים עד 140% מהתפוקה הנומינלית שלו. בכך מגיע מזגן אינוורטר מהר יותר לטמפרטורה הרצויה לעומת מזגן רגיל, אך כשהטמפרטורה בחלל הממוזג מתחילה להתקרב לטמפרטורה הנדרשת, המדחס אינו מפסיק את פעולתו כמו מזגן רגיל, אלא מתחיל להוריד את תפוקתו, עד כדי ערך התפוקה המינימלי, על מנת לשמור על טמפרטורה יציבה ועל איזון ברמת הלחות. בין היתר, פעולה בצורה כזאת מצליחה להשיג חיסכון בצריכת החשמל לאורך זמן, לעומת מזגן רגיל, שפעולת ה- ON/OFF בכיבוי ובהפעלה של המדחס גורמת אי-נוחות תרמית (תופעת גלי חום וגלי קור) ובזבוז חשמל. יתרה מזאת, היות שמדחס של מזגן אינוורטר מותנע פחות פעמים, הוא גם נשחק פחות לעומת מדחס של מזגן רגיל. ספקיות מזגני האינוורטר מדווחות כי אלה מזגנים חרישיים יותר, וכי הם פועלים ביעילות גבוהה מזו של מזגן רגיל, בטמפרטורה סביבה קיצונית.

איור 3: גרף צריכת חשמל של מזגן אינוורטר במצב קירור בשעות הצהריים והלילה

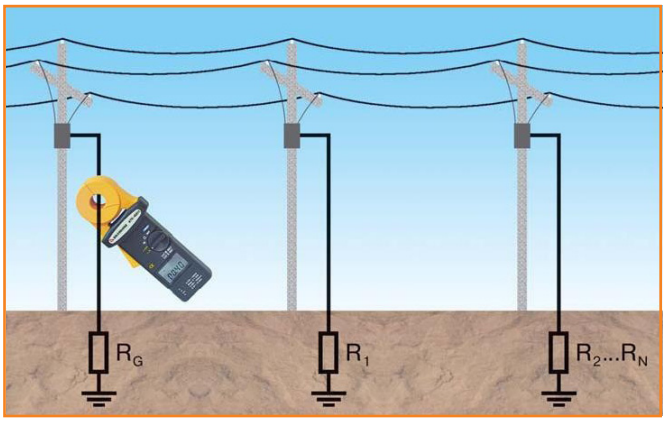


באיור 3 מוצג לדוגמא אופיין פעולה של מזגן אינוורטר במהלך כמה שעות עבודה. אפשר לראות שבתחילת פעולתו הוא פעל בשיא התפוקה שלו (מקסימום הספק חשמלי של כ-1,480 ואט), ולאחר מכם התייצב על 1,200 ואט. ניתן להבחין שבשעה 13:00 לערך חלה ירידה בצריכת החשמל (ירידה בתפוקת הקירור, ככל הנראה עקב משוב מהחלל הממוזג). בנוסף ניתן להבחין, שבהפעלה החדשה, בשעה 19:00 לערך, המזגן עבד בתפוקה נמוכה יותר. הפעם, היות שמדובר בשעות הערב, לא היה צורך

המשך בעמוד 15

>>> זאב קוסטנוביץ'

תיל הארקה כחלק ממערכת הארקה של רשת מתח גבוה



נחיצותו של תיל הארקה ברשת מתח גבוה עילית היא סוגיה שנוגעת במעגלים נרחבים של העוסקים בתכנון, בביצוע, בהפעלה ובאחזקה של רשת מתח גבוה. לדוגמא, הקטנת ערכי התנגדות ההארקה של עמודי רשת מתח גבוה למסה הכללית של האדמה, אופן הביצוע של הארקת השיטה של שנאי חלוקה ברשת עילית, הקטנת מתח מגע ומתח צעד בזמן הפרעה ברשת ובזמן חיפוש מיקום ההפרעה, הקטנת זרמי קצר חד-פאזי לאדמה - כל אלה הם חלק מהנושאים שיש לדון בהם במסגרת סוגיית נחיצותו של תיל הארקה ברשת עילית מתח גבוה. בעבר היה היקף הרשת העילית מתח גבוה, ובמיוחד עמודי מתכת ברשת הנמצאים בקרבת ריכוזי אוכלוסייה, קטן בהרבה מאשר היום, והנחת העבודה הייתה, שגישה של אנשים לעמודי המתכת היא מוגבלת, ולפיכך ההסתברות לפגיעה אינה גדולה. לכן, משיקולים כלכליים לא בוצעה התקנת תיל הארקה, ולא הושם דגש חזק מספיק בקיומו של תיל הארקה ברשת עילית. בשל עובדה זו, כיום עדיין אפשר למצוא הרבה רשתות מתח גבוה עיליות שנבנו בעבר ללא תיל הארקה. בימינו המצב כבר השתנה לחלוטין, והדבר קורה בשל תהליך האורבניזציה בעשורים האחרונים.

מטרת המאמר היא להצביע על חשיבותו ועל נחיצותו של תיל הארקה, ולהאיר את השפעתו על פרמטרים של הרשת. במסגרת המאמר נסקור את היתרונות הרבים של התקנת תיל הארקה, ונדגיש מספר חסרונות אשר יוצרת התקנתו של תיל הארקה ברשת עילית מתח גבוה.

הרוב המכריע של רשתות החלוקה מתח גבוה בארץ בנוי מרשתות מתח גבוה ברמות מתח 22 או 33 ק"ו. ישנן רשתות חלוקה ברמת מתח 13 ק"ו, בעיקר בערים הגדולות. למשל, במתקני חברת "מקורות" נעשה שימוש ברשת מתח גבוה ברמת מתח 3.3 ק"ו. כמו כן, בתחנות כוח מהווה רשת חלוקה במתח 6.6 ק"ו רשת לשימוש עצמי בתחנה. במאמר אחד לא ניתן להתייחס לרשתות בכל המתחים, עקב השוני במאפיינים ובאופן ההפעלה של הרשתות השונות. לכן, במאמר זה נדון ברשתות עיליות ברמות מתח 22 ו-33 ק"ו, שהן הנפוצות ביותר בארץ.

מתח צעד ומתח מגע

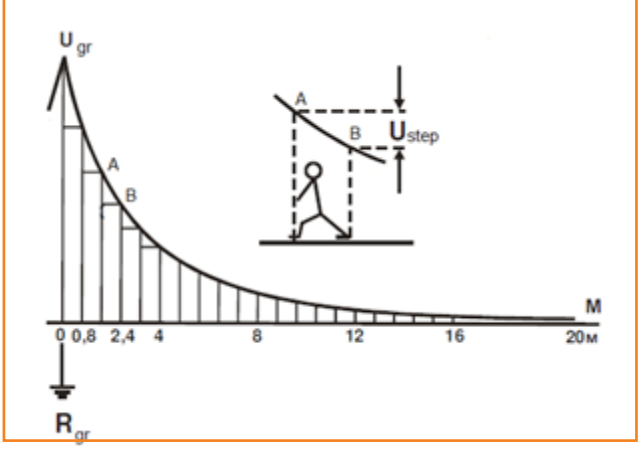
לעיתים מתרחשות ברשתות מתח גבוה הפרעות המשנות את המשטר התפעולי של הרשת, ובמקרים מסוימים משבשות את אספקת החשמל לצרכנים. תקלות כמו פריצות בידוד בין צד מתח גבוה ומתח נמוך בשנאי חלוקה, קריעת תיל פאזה של מתח גבוה, זחילה על גבי המבודדים, פגיעה של ציפורים, פריצת מופות בכבלי מתח גבוה, פגיעה ברשת תת-קרקעית עקב עבודות עפר ועוד, גורמות להיווצרות קצר חד-פאזי לאדמה ברשת מתח גבוה. בהתאם לסוג התקלה המתרחשת ברשת מתח גבוה, קצר חד-פאזי יכול לקרות במקומות שונים ברשת. לדוגמא, האבק הנצבר על גבי המבדדים בחודשי הקיץ, ביחד עם הלחות הקיימת בשעות הבוקר המוקדמות, יגרמו לזחילה על מבדד, וכך ייווצר קצר חד-פאזי לעמוד. לעומת זאת, פריצת מופה ברשת תת-קרקעית מתח גבוה תגרום לקצר חד-פאזי באמצע הרשת, ובזמן התקלה יזרום זרם תקלה דרך מקום הפגיעה. אם קצר חד-פאזי מתרחש על גבי העמוד, נוצרים מתחי מגע ומתחי צעד, אשר יכולים להיות מסוכנים לעוברי אורח או לצוותים מקצועיים הנמצאים במגע עם העמוד הפגוע או מצויים בקרבתו.

יש להבדיל בין המקרה שבו קיים קצר חד-פאזי לחלק מוארק, למשל פריצת בידוד בין כבל מתח גבוה לבין לוח מתח גבוה שמוארק במרכזיה, לבין מקרה שבו קצר קורה בין פאזה לבין חלק שאיננו מוארק. ברור כי ערכי זרמי הקצר בשני המקרים הם שונים. במקרה שיֵש קצר לחלק שאיננו מוארק, קיימת התנגדות משמעותית למעבר זרם בין הפאזה לבין המסה הכללית של האדמה, ולכן, זרם תקלה במקרה זה הוא קטן בהרבה מאשר במקרה הראשון. מנגד, ערכי מתחי המגע והצעד תלויים במכפלת זרם שזורם דרך מערכת הארקה במקום התקלה וההתנגדות של מערכת ההארקה כלפי המסה הכללית של האדמה. לכן, על מנת להבטיח בטיחות שימוש ברשת, יש להבטיח הן את הקטנת ערכי הזרם, והן את הקטנת התנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה. שימוש בתיל הארקה ברשת מתח גבוה מבטיח את שני הדברים גם יחד.

קיום תיל הארקה ברשת מתח גבוה מקטין באופן משמעותי את הזרם הזורם דרך העמוד הפגוע (שבו אירע הקצר) בזמן התקלה

הקשר של הגופים המתכתיים במתקני חשמל או חלקים מתכתיים של מכשור חשמלי עם המסה הכללית של האדמה

איור 1: מתח צעד כתלות במרחק מאלקטרודת ההארקה



מבוצע בעזרת אלקטרודות ו/או מערך אלקטרודות מתכתיות המחוברות ביחד (במקביל). האלקטרודות נמצאות באדמה, ומספקות את המגע הגלווני לאדמה. החיבור בין האלקטרודות לבין החלקים המוארקים נעשה על-ידי מוליכי הארקה. מערך אלקטרודות ביחד עם מוליכי הארקה מהווה מיתקן הארקה. אם דרך אלקטרודה בודדת בצורה של מוט להעביר זרם I_{sc}, ועל פני השטח אפשר לצייר קו אופקי בכיוון כלשהו מנקודה בה נכנסת האלקטרודה לאדמה, ובנוסף על הקו זה למדוד התפלגות מתחים ביחס לנקודה מרוחקת מאוד מהאלקטרודה, אזי צורת ההתפלגות היא כפי שמופיע באיור 1.

כמתואר באיור 1, בנקודות הנמצאות במרחק גדול מ-20 מטר מאלקטרודה, המתח ביחס הנקודה הרחוקה של האדמה הוא אפס. בספרות המקצועית נהוג לומר, כי הנקודות במרחק גדול מ-20 מטר מאלקטרודה נקראות נקודות של אפס פוטנציאל.

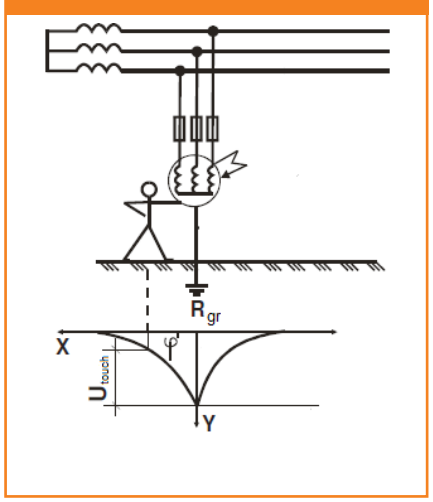
לכן, ניתן להגדיר כך רק נקודות המרוחקות מספיק ממתקן ההארקה (בדוגמא של אלקטרודה בודדת, נקודה מרוחקת היא נקודה במרחק מעל ל-20 מטר). פוטנציאל הנקודות המרוחקות הללו ביחס לאדמה הוא כמעט אפסי. חשוב לציין, כי עבור מתקני הארקה מסובכים יותר (למשל, עבור מערך אלקטרודות או אלקטרודה אופקית), נקודות של אפס פוטנציאל יכולות להיות במרחק העולה על 20 מטר.

התנגדות של מיתקן הארקה כלפי המסה הכללית של האדמה R_{gr} מוגדרת כיחס בין ערך הפוטנציאל על גבי מיתקן ההארקה שנמדד ביחס לנקודות מרוחקות (נקודות אפס פוטנציאל) לבין זרם הזורם דרך מיתקן ההארקה, כמתואר במשוואה הבאה:

$$R_{gr} = \frac{U_{gr}}{I_{sc}}$$

כפי שניתן לראות באיור 1, בין כל שתי נקודות על פני האדמה בקרבת האלקטרודה שדרכה זורם זרם, ישנו הפרש פוטנציאלים. לכן, אדם הנמצא בקרבת האלקטרודה ועושה צעד נמצא תחת הפרש פוטנציאלים הנקרא מתח צעד, U_{step} וכך נוצר דרך גוף האדם זרם במסלול רגל-רגל. קל לראות, כי מתח צעד קטן עם התרחקות מהאלקטרודה. הסטטיסטיקה של מקרי התחשמלות אנשים מלמדת, כי לא שכיחים המקרים שאדם נפגע ממתח צעד, והדבר כנראה נובע מכך שנקטים אמצעים נגד פגיעות כאלו. לדוגמא, התחשמלות ממתחי צעד יכולה להתרחש בקרבת תיל פאזי קרוע הנמצא על האדמה, ולכן חשוב לגדר את האזור שבו נמצא תיל קרוע, ולמנוע גישה של אנשים ובעלי חיים לשטח המסוכן. עם זאת, אנשים אכן נפגעים לעיתים ממתחי צעד בזמן פגיעת ברק בעמודי חשמל. ברור כי מתחי צעד מסוכנים יותר עבור בעלי חיים, שכן אורך צעד של סוס הוא גדול יותר מאשר אורך צעד של אדם. בספרות מקצועית מקובל להניח, כי אורך הצעד של אדם ממוצע הוא 80 סנטימטרים.

איור 2: מתח מגע



פרמטר נוסף אשר מאפיין רמת סכנת התחשמלות אשר קיימת בזמן קצר חד-פאזי לאדמה הוא המתח שאדם נחשף אליו בעת נגיעה בגוף המחושמל. מתח זה נקרא מתח מגע, והוא תלוי בהתנגדות של לולאת התקלה הנוצרת בזמן הקצר. מתח המגע הוא חלק של המתח המתפתח בין הגוף המחושמל לבין הנקודה שבה נמצא האדם ביחס לגוף המחושמל, כמתואר באיור 2.

בישראל, מתח המגע המותר במיתקנים רגילים הוא 50 וולט, ובמיתקנים של סכנה מוגברת - 24 וולט בלבד.

זרמי הקצר במשטרים שונים של נקודת האפס בשנאי בתחנת המשנה

על מנת להגן על האנשים ובעלי החיים הנמצאים בקרבת עמוד רשת עילית שבו אירע קצר חד-פאזי לגוף העמוד, יש צורך למנוע רמות מסוכנות של מתחי מגע או מתח צעד בקרבת העמוד, והדבר נעשה באמצעות הארקתו. בעמודי המתכת, רגל העמוד, אשר נמצאת כ-2.5 מטרים בתוך יסוד מבטון הנמצא באדמה, מהווה אלקטרודה טבעית. כמו כן, נהוג להאריק עמודים מבטון מזוין. במקרה זה, הזיון של העמוד הנמצא בתוך בטון וטמון באדמה מהווה אלקטרודה טבעית. את עמודי העץ הנמצאים בקווי מתח גבוה עיליים לא מאריקים. שימוש בעמודי עץ הולך ופוחת בשנים האחרונות, ולכן, לצורכי הניתוח כאן, נניח כי לא קיימים עמודי עץ בתוך קו מתח גבוה.

אם נתבונן במתח המתפתח על עמוד שבו אירע קצר חד-פאזי לגוף העמוד, נמצא כי ערכו תלוי בצורה ישירה במכפלה שבין זרם התקלה לבין התנגדות ההארקה של העמוד כלפי המסה הכללית של האדמה. מתח המתפתח על העמוד בזמן שדרכו זורם זרם התקלה מהווה מרכיב מכריע בערכי מתחי מגע ומתח צעד המתפתחים בעמוד זה.

ערכי זרם התקלה תלויים בתפעול נקודת האפס של השנאי בתחנת המשנה המזינה את רשת המתח הגבוה. רשתות שבהן נקודת האפס של השנאי המזין אותן מבודדת, מתאפיינות בערכים נמוכים של זרמי תקלה במקרים של קצר חד-פאזי לגוף העמוד. במקרה זה ניתן לומר, כי על מנת להגיע למתחי מגע ומתחי צעד קטנים, אפשר להסתפק בערכים גבוהים יחסית של הארקה של העמוד כלפי המסה הכללית של האדמה, בשל ערכי זרם התקלה הקטנים.

ערכי הקיבוליות של רשתות מתח גבוה עיליות משפיעים על ערכו של זרם התקלה, והם יכולים לנוע בגבולות של 5 ÷ 10nF/km. לדוגמא, ברשת עילית מתח גבוה 22 ק"ו באורך כולל של כ-100 קילומטרים (האורך הכולל של כל הקווים היוצאים מפס צבירה מסוים בתחנת המשנה) וקיבול ממוצע של כ-7.5nF/km, יהיה זרם הקצר בעת קצר חד-פאזי לאדמה כמתואר במשוואה הבאה:

$$I_{sc} = 3U_{ph}wC = 3 \cdot \frac{22000}{\sqrt{3}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 7.5 \cdot 10^{-9} \cong 8.95A$$

לכן, בהתחשב במגבלת מתח מגע של 50 וולט, ערכי ההתנגדות של מיתקן ההארקה כלפי המסה הכללית של האדמה R_{gr} של העמוד לא יעלו על ערך של:

$$R_{gr} = \frac{50V}{8.95A} \cong 5.58\Omega$$

על מנת להתגבר על הצתות חוזרות של קשת חשמלית הנוצרת במקום של קצר חד-פאזי לאדמה, מאריקים את נקודת האפס של השנאי בתחנות המשנה בעזרת סליל כיבוי. בזמן קצר חד-פאזי לאדמה במקום כלשהו ברשת יוצר סליל זה זרם השראתי השווה בגודלו לזרם קיבולי הנוצר בזמן הקצר. תהליך זה נקרא קיזוז של זרם קיבולי הנוצר בזמן הקצר על-ידי זרם השראתי הנוצר על ידי סליל הכיבוי. קיזוז מלא של זרם קיבולי ייתכן רק אם ערך ההשראות של סליל הכיבוי משתנה בהתאם להתקדמות הפיתוח של רשת החלוקה של המתח הגבוה. אולם, בקיזוז מלא של הזרמים הקיבוליים הנוצרים בזמן התקלה, מתקבלת תהודה

במעגל של התקלה. בזמן התהודה נוצר כא"מ (כוח אלקטרו מניע) בתדר הרשת, וכתוצאה מכך מתחיל לזרום דרך מקום התקלה זרם שיורי. ערך זרם זה תלוי בהפסדים אקטיביים במרכיבי הרשת (כגון, שנאים, תילים, סליל כיבוי וכדומה), בזרמים הנוצרים בשל הרמוניות גבוהות הקיימות ברשת, ובהפסדי הקורונה. ערכו של הזרם השיורי יכול להגיע ל-10% בערך מזרם סליל הכיבוי. לדוגמא, עבור סליל כיבוי בהספק של 2077 kVAr הנמצא בשימוש של חברת החשמל לרשתות מתח גבוה 22 ק"ו, ערכו של הזרם השיורי יהיה:

$$I_{add} = \frac{\sqrt{3} \cdot 2000 \cdot 0.1}{22} \cong 16.3A$$

כמו כן, בזמן התהודה יכולים להופיע מתחי יתר, הן על סליל הכיבוי והן על מרכיבי הרשת השונים. לכן, מכיילים את ערך השראות של סליל הכיבוי כך שהזרם שמזרים הסליל יהיה גבוה ב- 15% ÷ 10 מזרם קיבולי של הרשת. לפיכך, ברשת עילית מתח גבוה 22 ק"ו באורך כולל של כ-100 קילומטרים וקיבול ממוצע של כ-7.5nF/km עם סליל כיבוי בהספק של 2077 kVAr, זרם הקצר בעת קצר חד-פאזי לאדמה יהיה:

$$I_{sc} = 16.3A + 0.1 \cdot 8.95A \cong 17.2A$$

פיתוח רשתות מתח גבוה בשטחים אורבניים אינו מאפשר ברוב המקרים שימוש ברשתות עיליות. לכן, בשנים האחרונות נוספו לקווי החלוקה של רשתות מתח גבוה מאות קילומטרים של רשת מתח גבוה שהיא תת-קרקעית. ערכי הקיבוליות של כבלי מתח גבוה יכולים לנוע בגבולות של 160 ÷ 250nF/km . ערכי קיבוליות אלה אינם מאפשרים שימוש בסלילי הכיבוי לצורך קיזוז זרמים קיבוליים הנוצרים בזמן קצר חד-פאזי לאדמה ברשת, בשל ערכו הגבוה של הזרם הקיבולי. ברשתות המכילות כבלי מתח גבוה בכמות ניכרת משתמשים בהארקה של נקודת האפס של השנאי בתחנת המשנה ישירות לאדמה. החיסרון העיקרי של שיטה זו הוא זרמי קצר גדולים מאוד (אלפי אמפרים). בשל כך, נדרשת התנגדות נמוכה מאוד כלפי המסה הכללית של האדמה, הן בתחנות המשנה והן בעמודי מתח גבוה (או בתחנות טרנספורמציה פנימיות) המרכיבות את הרשת. לדוגמא, עבור זרמי קצר של $I_{sc}=10kA$ נדרשת התנגדות של כ- $5\ m\Omega$ כלפי המסה הכללית של האדמה. ערך זה ניתן להשיג במתקני מתח גבוה בעלי הארקת יסוד, כגון תחנות משנה, תחנות טרנספורמציה פנימיות וכדומה, אולם ברור כי לא ניתן להשיג ערך זה של התנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה בעמודי מתח גבוה.

חיבור עכבה (לא מדובר בסליל כיבוי) בנקודת האפס של השנאי מאפשר להגביל את זרמי הקצר במקרה של קצר חד-פאזי לאדמה, בניגוד לחיבור נקודת האפס ישירות לאדמה. כמו כן, עכבה זו משמשת לפריקת הקיבוליות של הרשת כלפי האדמה, וכך מאפשרת, ברוב המקרים, לכבות את הקשת הנוצרת בזמן התקלה, ומבטלת את האפשרות של הצתת הקשת מחדש. העכבה יכולה להיות אקטיבית טהורה או ריאקטיבית השראית. מבחינה טכנית, עכבה ריאקטיבית עדיפה, מפני שאותה מגבלה של ערך זרם התקלה בזמן קצר חד-פאזי לאדמה ניתן להשיג באמצעות ערך עכבה ריאקטיבית קטן יותר מאשר באמצעות עכבה התנגדותית טהורה.

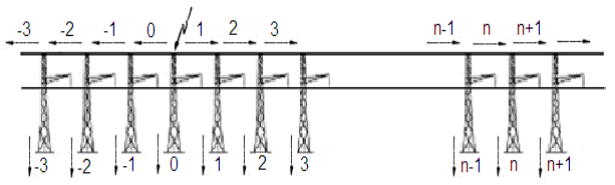
כפי שהוסבר לעיל, בחירת משטר נקודת האפס בתחנות המשנה משפיעה בצורה ישירה על אופן ביצוע ההארקה של מתקני מתח גבוה המוזנים מאותה תחנת משנה. הארקה ישירה של נקודת האפס, המאפשרת זרמי קצר גדולים לאדמה, דורשת ביצוע הארקות של מיתקני מתח גבוה עם ערך נמוך של ההתנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה. לעומת זאת, נקודת אפס מבודדת או מוארקת דרך סליל כיבוי מאפשרת זרמי קצר קטנים יחסית, ולכן, ההתנגדות של מתקני מתח גבוה כלפי המסה הכללית של האדמה יכולה להיות גדולה יחסית. אולם, חשוב לזכור כי במשטרים אלה (נקודת אפס מבודדת או מוארקת דרך סליל כיבוי) ניתן להפעיל את הרשת ולספק חשמל לצרכנים משך זמן רב גם במסגרת משטר של קצר חד-פאזי לאדמה. לכן, מערכות הארקה ברשתות מתח גבוה אלה צריכות להיות בעלי עמידות תֶרמית גבוהה. ברשתות בהן נקודת האפס מוארקת דרך התנגדות (אוהמים או השראית), יש לבנות מערכות הארקה עם הערכים המתאימים לזרם הקצר שמתפתח בזמן קצר חד-פאזי לאדמה.

ניתוח כללי של קצר חד-פאזי לאדמה

כאמור, ערכי התנגדות הארקת של מתקני מתח גבוה, ובמיוחד עמודי מתכת ברשתות עיליות של מתח גבוה, משפיעים על אופן עבודת הרשת במשטרים שונים של הארקת נקודת האפס של השנאי שממנו מוזנת הרשת בתחנת המשנה. ככלל, רוב זרם התקלה זורם לאדמה דרך העמוד שבו אירע הקצר. אולם, אם ברשת העילית קיים תיל הארקה המקשר בין כל העמודים, אזי זרם הקצר זורם לא רק דרך העמוד הפגוע, אלא גם מתחלק בין כל העמודים המקושרים ביניהם באמצעות תיל הארקה. לכן, תיל הארקה ממלא תפקיד חשוב ברשתות מתח גבוה עיליות. יש מקום לחדד את תפקידו של תיל הארקה בזמן קצר חד-פאזי לאדמה ברשת מתח גבוה. חשוב להבין איזה חלק של זרם התקלה זורם דרך העמוד הפגוע, ואיזה חלק מתפזר על גבי העמודים הסמוכים לו. כמו כן, חשוב להבין מהי התרומה של תיל הארקה לערך של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה של כל העמודים ברשת גם יחד.

נניח כי בקו עילי מתח גבוה, שבו קיים תיל הארקה המחבר בין כל העמודים, אירע קצר חד-פאזי לאדמה בעמוד 0 (ראו איור 3). זרם התקלה מתפלג בצורה הבאה: החלק הראשון של הזרם יזרום דרך עמוד 0 לאדמה, ויחזור למקור ההזנה (תחנת המשנה) דרך האדמה. החלק השני של זרם התקלה יזרום דרך התיל הארקה עצמו, ויחזור למקור ההזנה דרך מערכת הארקה של תחנת המשנה (אם תיל הארקה מחובר למערכת הארקה של התחנה, או דרך האדמה - במקרה שתיל הארקה איננו מחובר למערכת ההארקה של התחנה) והחלק השלישי של הזרם יחזור דרך

איור 3: מסלול זרם תקלה בעת קצר חד-פאזי לאדמה בקו מתח גבוה עילי



העמודים הסמוכים לאדמה ולמקור ההזנה (כמתואר באיור 3). לצורך פשטות הדיון, נניח כי ערכי ההתנגדות של כל העמודים ברשת העילית כלפי המסה הכללית של האדמה הם שווים:

$$R_0 = R_1 = R_{-1} = R_2 = R_{-2} = \cdots = R_n = R_{-n} = \cdots = R$$

כמו כן, נניח כי ערכי ההתנגדות של כל קטעי תיל הארקה בין שני עמודים סמוכים ברשת הם שווים:

$$r_1 = r_{-1} = r_2 = r_{-2} = \cdots = r_n = r_{-n} = \cdots = r$$

זרם הזורם דרך העמוד ה-n לאדמה ניתן לייצג בצורה של $I_n = Ae^{-\alpha n}$, כאשר A ו-α הם פרמטרים. ככל שמתרחקים מהעמוד שבו אירע קצר חד-פאזי לאדמה, ערך הזרם שזורם דרך העמוד לאדמה פוחת בצורה אקספוננציאלית. כלומר, חלק של זרם התקלה יזרום דרך העמוד הפגוע, ושאר הזרם יתפזר בין כל

העמודים המקושרים באמצעות תיל הארקה בהתאם לפרמטר α.

לפיכך, חשיבותו של תיל הארקה היא בכך, שהוא משמש כמחלק זרם בזמן קצר חד-פאזי לאדמה, על-ידי חלוקת הזרם בין כל העמודים המקושרים על ידי התיל. לעומת זאת, במקרה שבו תיל הארקה אינו קיים, כל זרם התקלה יזרום דרך העמוד הפגוע. מכל האמור לעיל ניתן להסיק, כי תיל הארקה הוא חלק ממערכת ההארקה של עמודי רשת מתח גבוה, והוא מקטין את ההתנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה של כל עמוד ועמוד ברשת.

בהתאם לנוהלי חברת החשמל, הערך המרבי של התנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה של עמוד ברשת מתח גבוה הוא עד $R = 20\ \Omega$ עבור עמודים עם ציוד מתח גבוה, ועד $R = 80\ \Omega$ עבור עמודים ללא ציוד עליהם. בטבלה 1 מוצגים הערכים של פרמטר α עבור כל התיילים שנמצאים בשימוש ברשתות מתח גבוה של חברת החשמל.

טבלה 1: ערכי פרמטר בהתאמה לשטח החתך ולסוג של תילי הארקה

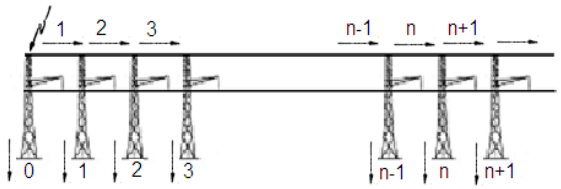
שטח החתך של תיל הארקה (ממ"ר)	חומר	התנגדות Ω/km	α
50/8	אלומיניום-פלדה	0.594	0.029
95/15	אלומיניום-פלדה	0.319	0.022
150/25	אלומיניום-פלדה	0.194	0.017
16	נחושת	1.123	0.041
35	נחושת	0.525	0.028
70	נחושת	0.271	0.02
95	נחושת	0.192	0.017
185	נחושת	0.098	0.012
240	נחושת	0.074	0.011
70	סגסוגת אלומיניום	0.5026	0.027
120	אלומיניום	0.245	0.019
150	אלומיניום	0.196	0.017
185	אלומיניום	0.158	0.015

ניתן לראות, כי הפרמטר α גדל עם ההתנגדות לקילומטר של תיל הארקה. לכן, באמצעות שימוש בתיל עם התנגדות גדולה יותר לקילומטר יתפזר זרם התקלה בין מספר קטן של העמודים הסמוכים, שכן ההתנגדות של קטעי תיל הארקה בין העמודים היא גדולה, והזרם יעדיף לזרום דרך העמודים הקרובים לאדמה. לעומת זאת, אם בוחרים תיל הארקה עם התנגדות קטנה לקילומטר, אזי זרם התקלה יתפזר בין כמות גדולה יותר של העמודים הסמוכים, ולכן, במקרה זה, דרך מקום התקלה יזרום זרם קטן יחסית.

קצר חד-פאזי לאדמה בסוף קו

לאחר הצגת הניתוח הכללי ניתן להבחין בין מספר מקרים של קצר חד-פאזי לאדמה אשר נבדלים ביניהם במיקום הקצר: בסוף קו מתח גבוה, בתחילתו ובאמצע. המקרים של קצר בסוף הקו ובתחילתו הם כמעט זהים. ההבדל היחיד הוא, שאם התקלה מתרחשת בתחילת הקו ותיל הארקה של הרשת מחובר למערכת הארקה של תחנת המשנה, אזי גם מערכת הארקה של התחנה משתתפת בחלוקה של זרם התקלה. כלומר, בזמן קצר חד-פאזי לאדמה יזרום חלק מזרם הקצר דרך מערכת ההארקה של תחנת המשנה. חשוב להבין, כי ערך ההתנגדות השקולה של מערכת הארקה בתחנת המשנה כלפי המסה הכללית של האדמה הוא הרבה יותר קטן מזה של העמודים ברשת מתח גבוה. לכן, במקרה של תקלה בתחילת הקו, חלק גדול מזרם הקצר יזרום דרך מערכת ההארקה של תחנת המשנה.

איור 4: התפלגות מסלול זרם התקלה בעת קצר חד-פאזי לאדמה בקצה של קו מתח גבוה עילי



נניח כי בקו מתח גבוה עילי, שבו קיים תיל הארקה המחבר בין כל העמודים, אירע קצר חד-פאזי לאדמה בעמוד האחרון, 0. זרם התקלה I_{sc} מתפלג כמתואר באיור 4.

ערכו של זרם התקלה הזורם דרך העמוד הפגוע נקבע על בסיס הפרמטרים הבאים: סך כל הזרם הקצר I_{sc}, ערכה של ההתנגדות של שדה אחד של תיל הארקה r, וערכה של התנגדות כלפי המסה הכללית של האדמה של עמוד ברשת R, כמתואר במשוואה הבאה.

$$I_0 = I_{sc}\ \frac{1}{\frac{1}{2}+\sqrt{\frac{R}{r}+\frac{1}{4}}}$$

נסמן ב-R_{total} את ערכה של ההתנגדות השקולה של כל קו המתח הגבוה כלפי המסה הכללית של האדמה, ביחס לזרם הקצר החד-פאזי לאדמה אשר מתפתח בקצה הקו. כלומר, R_{total} מייצג את הערך של מערכת ההארקה הכוללת יסודות של כל העמודים ותיל ההארקה אשר קושר את העמודים. לכן, מתוך המשוואה $I_0R = I_{sc}R_{total}$ מקבלים את הערך של ההתנגדות השקולה של כל קו המתח הגבוה כלפי המסה הכללית של האדמה:

$$R_{total} = \frac{R}{\frac{1}{2}+\sqrt{\frac{R}{r}+\frac{1}{4}}}$$

הערכים של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור עמוד כלשהו בקו המתח הגבוה הכולל תיל הארקה מתוארים בטבלה 2.

טבלה 2: ערכי ההתנגדות השקולה של העמודים ותיל ההארקה כלפי המסה הכללית של האדמה (בעת תקלה בקצה הקו)

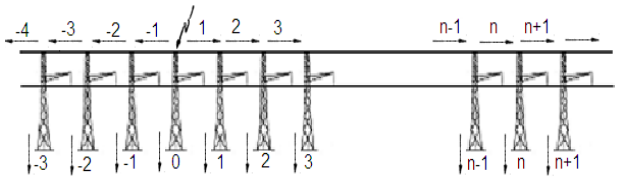
שטח החתך של תיל ההארקה (ממ"ר)	חומר	התנגדות (Ω) R_{total}
50/8	אלומיניום-פלדה	1.159
95/15	אלומיניום-פלדה	0.8569
150/25	אלומיניום-פלדה	0.679
16	נחושת	1.576
35	נחושת	1.091
70	נחושת	0.790
95	נחושת	0.667
185	נחושת	0.479
240	נחושת	0.417
70	סגסוגת אלומיניום	1.069
120	אלומיניום	0.752
150	אלומיניום	0.674
185	אלומיניום	0.606

בהתאם לנוהלי חברת החשמל, ההתנגדות השקולה של מערכת ההארקה של רשת מתח גבוה כלפי המסה הכללית של האדמה חייבת להיות קטנה מ-2Ω. מתוך טבלה 2 ניתן לראות, כי הדבר מושג בקלות באמצעות שימוש בתיל הארקה.

קצר חד-פאזי לאדמה באמצע הקו

לעיתים מתרחשת התקלה באחד העמודים הנמצאים בתוך הקו, ולאו דווקא בעמודים הקיצוניים. במקרה זה, הניתוח שונה מעט מאשר במקרה הקודם, אולם העקרונות זהים לחלוטין.

איור 5: התפלגות מסלול זרם התקלה בעת קצר חד-פאזי לאדמה במרכזו של קו מתח גבוה עילי



נניח כי בקו מתח גבוה עילי, שבו קיים תיל הארקה המחבר בין כל העמודים, אירע קצר חד-פאזי לאדמה בעמוד האחרון, 0. זרם התקלה I_{sc} מתפלג כמתואר באיור 5. לצורך הניתוח, נניח כי הצדדים (שמאל וימין) זהים מבחינת חישוב הזרמים השונים המתפתחים בזמן התקלה. הנחה זו סבירה בשל העובדה שאורכי קווי מתח גבוה נעים בין 10 ל-20 קילומטרים.

ערכו של זרם התקלה הזורם דרך העמוד הפגוע נקבע במשוואה הבאה:

$$I_0 = I_{sc}\frac{1}{\sqrt{1+4\frac{R}{r}}}$$

כמו כן, בדומה למקרה הקודם, ערכה של התנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה במקרה של התרחשות התקלה באמצע הקו הוא:

$$R_{total} = \frac{R}{\sqrt{1+4\frac{R}{r}}}$$

בטבלה 3 מוצגים הערכים של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור כל קו המתח הגבוה הכולל תיל הארקה.

טבלה 3: ערכי ההתנגדות השקולה של העמודים ותיל ההארקה כלפי המסה הכללית של האדמה (בעת תקלה במרכז הקו)

שטח החתך של תיל הארקה (ממ"ר)	חומר	התנגדות (Ω) R_{total}
50/8	אלומיניום-פלדה	0.597
95/15	אלומיניום-פלדה	0.437
150/25	אלומיניום-פלדה	0.341
16	נחושת	0.820
35	נחושת	0.561
70	נחושת	0.403
95	נחושת	0.339
185	נחושת	0.242
240	נחושת	0.211
70	סגסוגת אלומיניום	0.549
120	אלומיניום	0.383
150	אלומיניום	0.343
185	אלומיניום	0.308

מתוך טבלה מס' 3 ניתן לראות, כי ערכה של התנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה במקרה של התרחשות התקלה באמצע הקו, קטנה יותר מאשר אותה התנגדות כאשר התקלה מתרחשת בסוף הקו. הדבר נובע מכך שבמקרה של תקלה באמצע הקו, כמות העמודים הסמוכים גדולה פי שניים מזו כאשר התקלה מתרחשת בסוף הקו.

סיכום

זרם קצר חד-פאזי לאדמה מתפלג בין העמוד שבו אירעה התקלה ובין העמודים הסמוכים לו ומחוברים אליו באמצעות תיל הארקה. בשל כך, ערכה של ההתנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה קטן משמעותית אם קיים תיל הארקה ברשת. כמו כן, מתוך המשוואות המתארות את R_{total} ניתן להסיק, כי הערך של התנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה תלוי מאוד ביחס שבין ערך ההתנגדות של תיל הארקה לבין ערך התנגדות העמוד כלפי המסה הכללית של האדמה ($\frac{r}{R}$). ככל שהיחס קטן יותר, כך הערך של התנגדות השקולה כלפי המסה הכללית של האדמה עבור רשת מתח גבוה קטן יותר. ניתן להסביר זאת בכך, שהקטנת היחס $\frac{r}{R}$ גורמת להתפזרות זרם התקלה ליותר עמודים סמוכים למיקום התקלה, וכך, דרך כל עמוד סמוך יזרום חלק קטן של זרם התקלה. ברור כי התרחשות של קצר חד-פאזי לאדמה באמצע הקו עדיפה מאשר בסופו, שכן כמות העמודים המשתתפים בפיזור זרם התקלה באמצע הקו גדולה פי שניים מכמות העמודים בסופו.

לפיכך, קיום תיל הארקה ברשת מתח גבוה מקטין באופן משמעותי את הזרם הזורם דרך העמוד הפגוע (שבו אירע הקצר) בזמן התקלה, שכן כך ניתן להגיע לערכי מתחי מגע ומתחי צעד שאינם מסכנים את העוברים והשבים בסביבת העמוד. עם זאת, חשוב לציין כי מעצם קיומו של תיל הארקה עוברים חלקים מזרם התקלה לעמודים הסמוכים, בזמן שללא תיל זה כל התקלה מתרכזת בעמוד הפגוע.

הקטנת הזרם הזורם דרך העמוד הפגוע בזמן קצר חד-פאזי לאדמה חשובה בהיבט נוסף. כאשר בעמוד קיים שנאי חלוקה שהארקת השיטה שלו מחוברת לעמוד, אזי הקטנת זרמי התקלה דרך העמוד מאפשרת להקטין את עליית פוטנציאל השיטה באותו שנאי חלוקה, וכך להקטין את הסבירות לגרימת נזק לצרכני מתח נמוך.

>>> סימינה ברטשניידר

מחירי חימום בחורף

השוואה בין עלויות ההפעלה באמצעות מכשירים ומיתקנים שונים

מידע ונתונים לגבי מחירי חימום חדרים באמצעים שונים - חשמליים ואחרים בחורף 2016/2017, רוכזו ומוצגים בטבלה. המידע מיועד לסייע בחישוב הוצאות החימום בדירות מגורים. מדובר בהוצאות שוטפות בלבד, ללא חישוב עלויות עבור תשלום קבוע או ההשקעה ברכישה, בהתקנה ובתחזוקה.

בטור הראשון של הטבלה מפורטים 14 סוגי מכשירי חימום ומיתקני חימום ביתיים נפוצים בדירות מגורים. 6 מהם מופעלים בחשמל, והאחרים בנפט (קרוסין), בסולר או בגז.

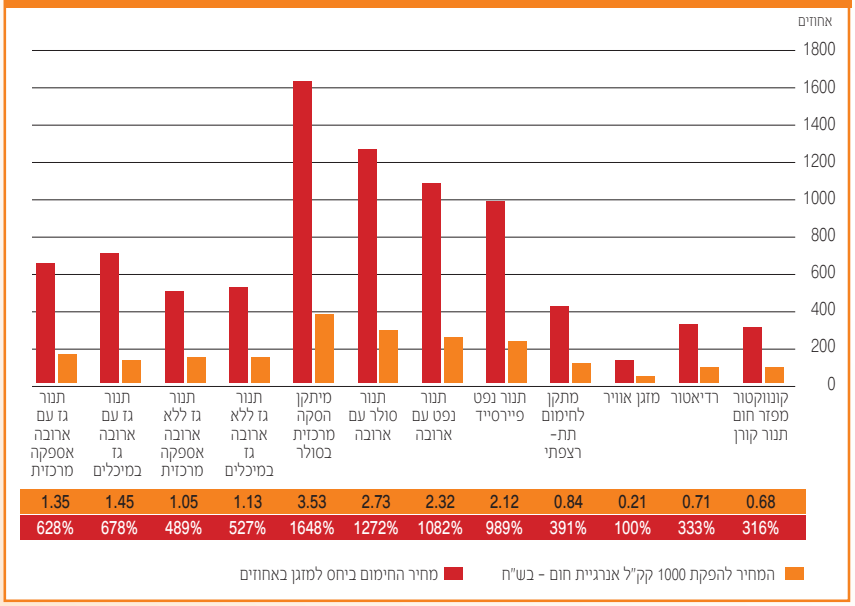
בטור השני של הטבלה מוצגים המחירים של יחידת חום (1,000 קק"ל "ברוטו") המתקבלת ממקורות אנרגיה מקובלים לחימום חדרים. אנרגיה זו מושקעת בפועל לשם הפעלת המכשיר או המיתקן. מחירים אלה, הכוללים מע"מ בשיעור 17%, חושבו בהתאם לערך הקלורי של מקור האנרגיה, לפי תעריף החשמל שבתוקף מ-1.1.2017, ובהתאם למחירי הדלקים (סולר, נפט וגז) שבתוקף בחודשים נובמבר ודצמבר 2016. הערכים בטבלה מבוססים על ממוצע של המחיר הגבוה ביותר והנמוך ביותר שהתקבלו.

בטור השלישי של הטבלה מוצג מקדם התפוקה המשוער של המכשירים והמיתקנים. מקדם התפוקה מוגדר כיחס בין כמות האנרגיה המנוצלת בפועל לשם העלאת הטמפרטורה בחדר לבין כמות האנרגיה הנצרכת לשם הפעלת המכשיר או המיתקן, ואשר עבורה משלם הצרכן. בהשוואה למכשיר חימום חשמלי (למשל, קונווקטור - מסיע חום), מקדם יעילות החימום של מכשירי חימום אשר מופעלים בגז הוא נמוך ב-5%-25%, ומקדם יעילות החימום של מכשירים אשר מופעלים בסולר נמוך ב45%-30%. מקדם היעילות הנמוך יחסית נובע משלוש סיבות עיקריות, הקשורות בעיקר למאפיינים הספציפיים של הדלקים ולתהליך הפיכתם לאנרגיית חום, כמתואר בהמשך.

מחיר ממוצע ליחידת חום (1,000 קק"ל) במכשירים ובמיתקני חימום מקובלים בדירת מגורים

סוג המכשיר/ המיתקן ומקור האנרגיה		מחיר ממוצע ל-1,000 קק"ל "ברוטו" (באגורות)	מקדם תפוקה משוער	מחיר ממוצע ל-1,000 קק"ל "נטו" בהשוואה למזגן אוויר (באגורות)	(באחוזים)
תנור קורן	חשמל	64	0.95	68	316
מפזר חום עם מנוע					
מסיע חום ("קונווקטור")					
רדיאטור שמן			0.90	71	333
מזגן אוויר (משאבת חום)			3	21	100
מיתקן לחימום תת-רצפתי			0.85-0.70	92-76	391
תנור "פיירסייד" - ללא ארובה	נפט	148	0.70	212	989
תנור נפט עם ארובה		151	0.65	232	1082
תנור סולר עם ארובה	סולר	177	0.65	273	1272
מיתקן הסקה מרכזית			0.50	353	1648
תנור ללא ארובה	גז במכלים	108	0.90	113	527
תנור עם ארובה			0.70	145	678
תנור ללא ארובה	גז באספקה מרכזית	94	0.90	105	489
תנור גז עם ארובה			0.70	135	628

השוואת מחירי חימום חדרים באמצעות מכשירים ומיתקנים שונים חורף 2016/7



הגורמים המשפיעים על ערכו של מקדם התפוקה הם:

הערך של מקדם התפוקה מושפע בעיקר משלושה גורמים, כדלהלן:

* **מידת ניצולו של הדלק שהוכנס למכשיר**, אשר תלויה, בין היתר, במידה שבה מתבצעת שריפת הדלק במכשיר או במיתקן (שלמות של שריפת הדלק), ברמת התקינות והתחזוקה של המכשיר או המיתקן, וברמת ההפסדים התֶרמיים בצנרת (למשל, במקרה של הסקת מרכזית).

* **כמות החום הנפלט אל מחוץ לחדר** שבו נדרש החימום, עקב החובה לאוורר את החדר ולחדש את כמות החמצן באוויר החדר, המנוצל בתהליך השריפה של דלקים נוזליים (סולר, נפט) וגז.

* **ניצול של החום המופק מן המכשיר או מן המיתקן תוך זמן מוגדר**. גורם זה נעשה משמעותי בעיקר כאשר מחממים באמצעות

המשך בעמוד 15

סימינה ברטשניידר - מהנדסת מערכות אנרגיה, המחלקה לייעול הצריכה, אגף שירות לקוחות, חברת החשמל

>>> שלומי לוי, גבי שליצקי

"תמונה אחת שווה אלף מילים"

לוח תלוי על גדר גן ילדים

בתמונות שלפניכם נראה גן ילדים תמים למראה, מוקף גדר ברזל. אך במבט מעמיק ניתן להבחין בכבל עילי אשר תלוי בקצהו האחד על קיר מבנה הגן, ובהמשכו - על עמוד ברזל המשמש כחלק מקונסטרוקציית סככה או פרגולה שבחצר הגן, והוא נמשך אל גדר הגן שבצד שמאל של התמונה.

התמונה השנייה מציגה למעשה את הצד החיצוני של גדר הגן, שעליה נתלה הכבל, ומשלימה את הקטסטרופה של התקנה זו. בתמונה השנייה נדון בהמשך.

איך בוצעה בכלל התקנה מסוכנת שכזאת? ובכן, בסמוך לגן הילדים הולך ונבנה בניין, והכבל הנראה בתמונות מזין בחשמל את אתר הבנייה, כך שגן הילדים משמש כמקור הזינה.

חשוב להבין, שבעת צילום התמונות היה מתקן זה תחת מתח. אמנם, איננו יודעים מהו סוג הכבל, אך על-פי התרשמותנו, הוא אינו בעל בידוד ייעודי המתאים לחשיפה לשמש (כלומר לפגעי חום וקרינה), לרטיבות, ולפגעי מזג אוויר אחרים, כנדרש בתקנה 11 לתקנות החשמל (התקנת כבלים במתח שאינו עולה על מתח נמוך), אשר עוסקת בהגנה בפני מיפגעים.

יתרה מזאת, שיטת ההתקנה מחפירה כשלעצמה - התלייה בוצעה ללא זיזים או זרועות נשיאה, ללא תיל נושא, בלא הבדדה בין הכבל לבין גדר הגן ועמוד הקונסטרוקציה של הפרגולה - הכל בניגוד לדרישת פרק ח' בתקנות החשמל (התקנת כבלים במתח שאינו עולה על מתח נמוך), אשר דן בהתקנת כבל עילי. וכך, אין כל ספק שפגיעה בבידוד של הכבל עלולה לגרום לחישמול העמוד או הגדר, שחשופים למגע ישיר של ילדי הגן.

כעת, הבה נתבונן בתמונה השנייה - שבה נראה הלוח הארעי אשר משמש את אתר הבנייה. התמונה מדברת בעד עצמה.

ראשית, למרות הרושם שיוצרת התמונה, מקום ההתקנה אינו מגודר: ללוח יכולים לגשת בכל עת העוברים והשבים סביב גן הילדים וסביב אתר הבנייה.

שנית, בתקנה 7 לתקנות החשמל (התקנת לוחות במתח עד 1,000 וולט) נקבע:

"(א) לוח ייקבע על משטח יציב או מבנה יציב בלבד.

(ב) קביעת לוח תהיה יציבה ופירוקו יתאפשר באמצעות כלים בלבד.

(ג) לוח יותקן כך שלא יסכן את סביבתו ולא יושפע לרעה על ידי מיתקנים אחרים...".

ברור לכל שצורת התקנה זו נוגדת את דרישת התקנות הללו. את היצירתיות השקיע מי שהתקין כבל זה דווקא בתליית הלוח באמצעות סרט קשירה. ולא זו בלבד, אלא שסרט התלייה כרוך על קצוות קרש עץ, שהוא כמעט משוחרר, כך שקיימת סכנה שיצנח אל הקרקע.

שלישית, כבל ההזנה ללוח, אשר תלוי על הגדר ויורד כלפי מטה אל הלוח, הותקן בתוך צינור גמיש שאינו משמש כהגנה מתאימה (הלוח תלוי בגובה 1.2 מטר לערך), וזאת בניגוד לנדרש בתקנה 22 בתקנות החשמל (התקנת כבלים במתח שאינו עולה על מתח נמוך), אשר עוסקת בהגנה בפני מיפגעים מכאניים, וקובעת:

"(א) כבל החייב בהגנה מכאנית יוגן באמצעות -

- צינור מתכת, ובלבד שיעמוד בהוראות תקנה 6;
- צינור פלסטי קשיח;
- כיסוי מגן קשיח אחר.

(ב) הגנה כאמור תתאים לתנאי המקום ותוצב בגובה 1.80 מטרים לפחות מפני הקרקע או הרצפה; הייתה ההגנה עשויה מחומר פלסטיק, יהיה החומר עמיד לקרינה אולטרה סגולית".

אם יש צד אופטימי לסיפור זה, הרי הוא בכך, שלאחר שהסבנו את תשומת ליבם של הגורמים האחראים, פורקה התקנה זו, שהיא מחדל בטיחותי חמור, במהרה.

שלומי לוי - מהנדס חשמל, מ"מ מנהל המחלקה לייעול הצריכה, אגף שירות לקוחות, חברת החשמל
גבי שליצקי - סגן מנהל מחלקת לקוחות טכניים, מחוז חיפה, חברת החשמל

המשך מעמוד 7

מזגני אינוורטר

לפעול בשיא התפוקה, כך שתוך זמן קצר התייצבה הטמפרטורה בחלל הממוזג, והתפוקה ירדה משמעותית כך שהצריכה ירדה לערך של כ-700 ואט. ניתן לראות למעשה, שמזגן אינוורטר משנה את התפוקה לפי הדרישה בחלל הממוזג, וזו מהות ההבדל בינו לבין מזגן ON/OFF רגיל.

יתרונות מזגן אינוורטר לעומת מזגן רגיל

- שומר על טמפרטורה יציבה בחלל הממוזג
- יעיל וחסכוני יותר בצריכת החשמל
- פחות שחיקה עקב פחות התנעות של המדחס
- יציבות ברמת הלחות
- פעולה חרישית יותר
- פועל בתנאי מזג אוויר קיצוניים

עוד ראוי לציין, שטכנולוגיית האינוורטר מיושמת גם במערכות המיזוג המיני-מרכזיות הביתיות. מערכת רב-מאייד אינוורטר או מולטי-אינוורטר היא מערכת מיזוג חכמה המאפשרת לחבר יחידה חיצונית אחת לכמה יחידות פנים - בתפוקות שונות, בסוגים שונים, ובשליטה מלאה ונפרדת עבור כל יחידה ויחידה. מהיחידה החיצונית מגיעה צנרת גז לכל יחידה פנימית, והיא מאפשרת לקבוע טמפרטורה שונה בכל חדר.

המלצות לבחירה נכונה של מזגן רגיל ומזגן אינוורטר

יש לזכור, שהעלות הראשונית של המזגן ועלות ההתקנה שלו הן רק חלק מהעלות הכוללת שלו. מנגד, רכישת מזגן יקר יותר אבל יעיל יותר מבחינה אנרגטית תתבטא בחיסכון בחשמל לאורך השנים. לכן, כאשר מבקשים לבחור מזגן בעל תפוקה מתאימה שהוא גם יעיל מבחינה אנרגטית, יש להביא בחשבון כמה שיקולים לפני שבוחרים את סוג המזגן המתאים וגודלו. עם השיקולים הללו נמנים: איזור אקלימי, הבידוד התרמי של המבנה, כמות החלונות וסוגם, קומת החלל הממוזג, וכמובן, שטח החלל הממוזג והאוריינטציה שלו. לדוגמא, חלל הפונה לכיוון דרום-מזרח סופג הרבה יותר חום בקיץ מאשר חלל צפוני.

במזגני ON/OFF רגילים, בחירה של מזגן בעל תפוקה מיזוג גדולה מדי תוביל להתנעות רבות של המדחס, לבלאי של המערכת, ולקיצור אורך החיים שלו, ואילו בחירת מזגן בעל תפוקה מיזוג קטנה מדי תוביל לרמת מיזוג נמוכה, לפעילות בלתי-פוסקת של המדחס, ולבזבוז חשמל.

על מנת לסבר את האוזן, כלל אצבע מציין 600-850 BTU/h לכל מ"ר במצבים רגילים. מומלץ להתייעץ עם בעל מקצוע לפני בחירת של תפוקת המזגן שתהיה נכונה לצרכן. במזגני אינוורטר, ההחלטה תהיה לפי הערך הנומינלי בנתונים הטכניים של המזגן. אך חשוב לשים לב גם לתחום הערכים שהמזגן יכול לספק: תחום ערכים רחב יותר יעניק גמישות רבה יותר.

סיכום

מזגני האינוורטר יעילים יותר, חסכוניים יותר, שקטים יותר, ושומרים על טמפרטורה יציבה בחלל הממוזג. לאור כל היתרונות הללו ולאור הביקוש להם והוזלת מחירים, ניתן לשער שבעתיד הקרוב הם יותקנו במיתקנים רבים. עם זאת יש לזכור, כי גם את המזגן היעיל ביותר, הפועל בטכנולוגיה החדשה ביותר, יש לנקות באופן קבוע, שאם לא כן, יעילותו פוחתת בעשרות אחוזים. יש להקפיד לנקות את המסננים (פילטרים) ביחידה הפנימית, ואת הסוללה ביחידה החיצונית.

המשך מעמוד 13

השוואת מחירי חימום חדרים

מכשירים ו/או מיתקנים אשר חולף פרק זמן מסוים מרגע הפעלתם ועד שהחום שמפיק המכשיר מורגש בפועל בחדר.

בטור הרביעי של הטבלה מופיעים מחירים ממוצעים של יחידת החום (1,000 קק"ל "נטו") המושקעת בפועל בחימום החדר. מחירים אלה מהווים את היחס בין המחיר של 1,000 קק"ל "ברוטו" (המוצג בטור השלישי) לבין מקדם התפוקה המשוער (המוצג בטור הרביעי של הטבלה).

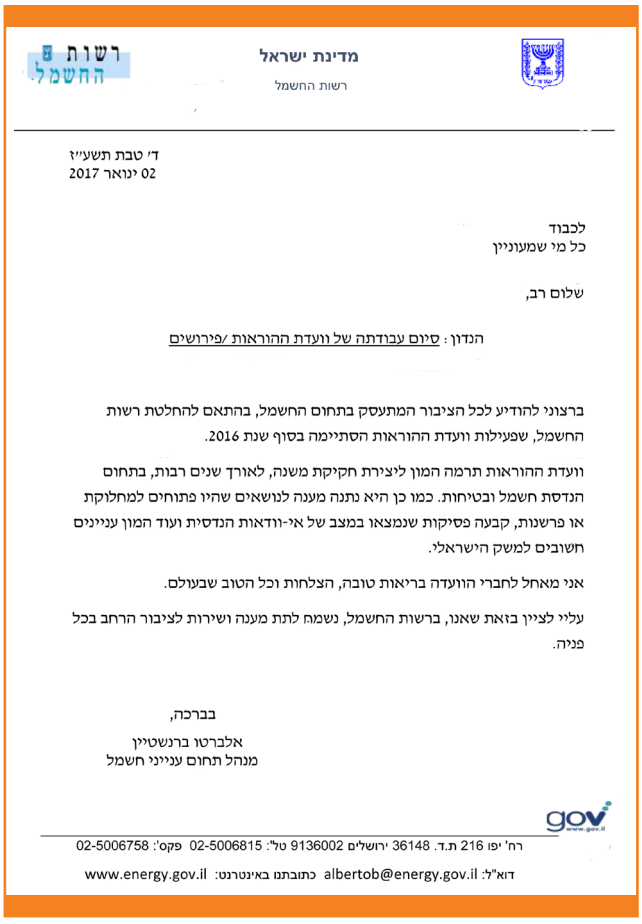
בטור החמישי של הטבלה מוצגים המחירים של 1,000 קק"ל "נטו", באגורות, ביחס למחיר יחידת החום ("נטו") שמפיק מזגן אוויר.

בטור השישי של הטבלה מוצגים המחירים של 1,000 קק"ל "נטו", באחוזים, ביחס למחיר יחידת החום ("נטו") שמפיק מזגן אוויר.

מהטבלה עולה, כי חימום באמצעות מזגן אוויר הוא הזול ביותר לעומת מכשירי חימום חשמליים נפוצים אחרים (כרבע עד שליש מהעלות). לעומת עלות ההפעלה של מזגן, החימום באמצעות מיתקני חימום אשר מופעלים בנפט יקר פי 10 עד 11, החימום באמצעות מיתקני חימום שמופעלים בסולר יקר פי 13 עד 17, והחימום באמצעות מיתקני חימום שמופעלים בגז יקר פי 5 עד 7 (יחסית למחירים ממוצעים).

אם בידי גורם כלשהו קיימים נתונים שונים מאלה המופיעים בטבלה, עליו לעדכן את המחירים בהתאם.

כמו כן, יש לעדכן את המחירים בכל מקרה של שינוי בתעריפים.



מדינת ישראל
רשות החשמל

רשות החשמל

ד' טבת תשע"ז
02 ינואר 2017

לכבוד
כל מי שמעוניין

שלום רב,

הנדון: סיום עבודתה של וועדת ההוראות /פירושים

ברצוני להודיע לכל הציבור המתעסק בתחום החשמל, בהתאם להחלטת רשות החשמל, שפעילות וועדת ההוראות הסתיימה בסוף שנת 2016.

וועדת ההוראות תרמה המון ליצירת חקיקת משנה, לאורך שנים רבות, בתחום הנדסת חשמל ובטיחות. כמו כן היא נתנה מענה לנושאים שהיו פתוחים למחלוקת או פרשנות, קבעה פסיקות שנמצאו במצב של אי-וודאות הנדסית ועוד המון עניינים חשובים למשק הישראלי.

אני מאחל לחברי הוועדה בריאות טובה, הצלחות וכל הטוב שבעולם.

עליי לציין בזאת שאנו, ברשות החשמל, נשמח לתת מענה ושירות לציבור הרחב בכל פניה.

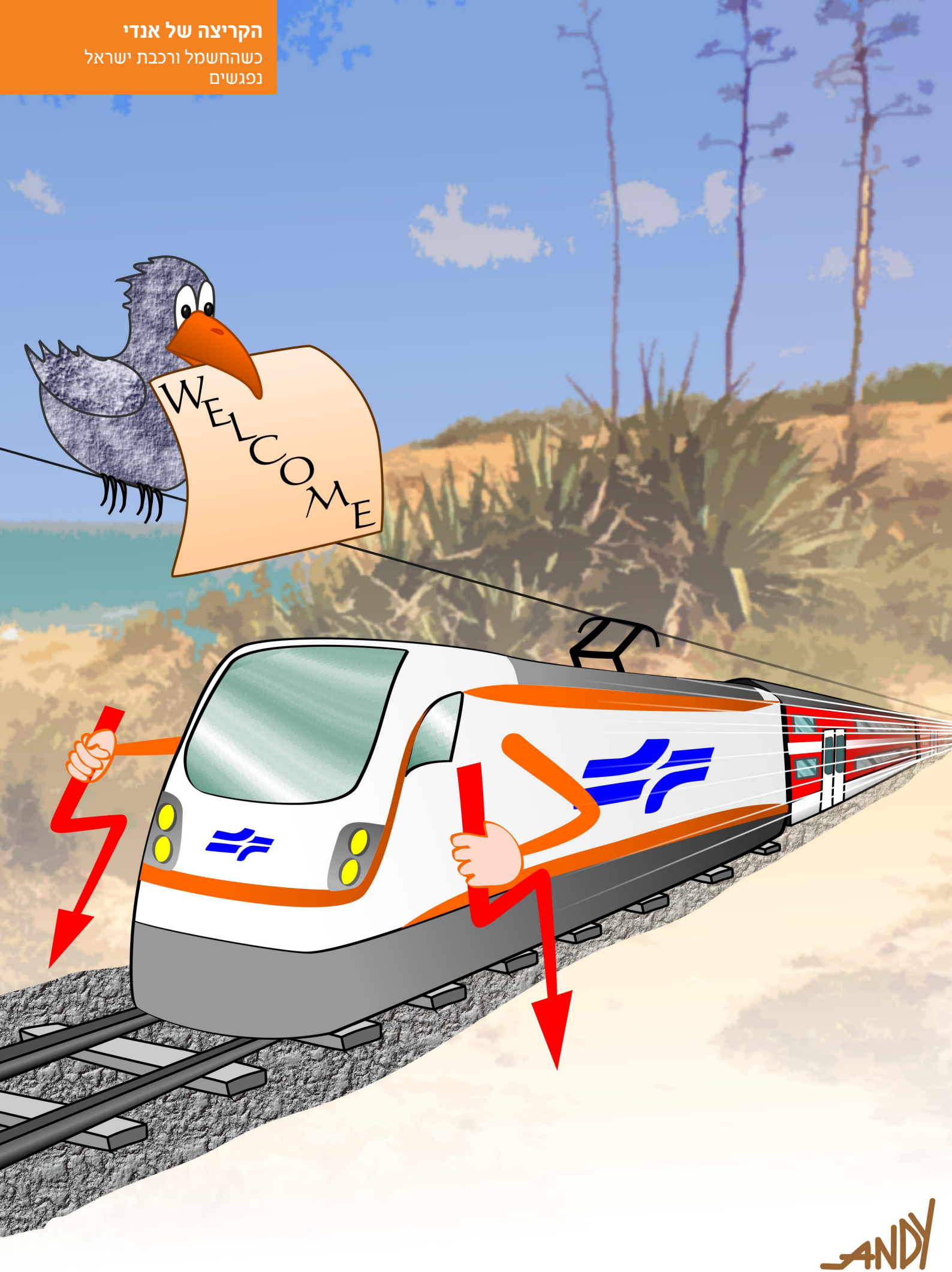
בברכה,

אלברטו ברנשטיין
מנהל תחום ענייני חשמל

gov www.gov.il

רח' יפו 216 ת.ד. 36148 ירושלים 9136002 טל': 02-5006815 פקס': 02-5006758

דוא"ל: albertob@energy.gov.il כתובתנו באינטרנט: www.energy.gov.il

הקריצה של אנדי

כשהחשמל ורכבת ישראל נפגשים