

בטיחות בשימוש ובעבודה בחשמל

מאת
אליהו ברזלי

המוסד לבטיחות ולגיהות
מחלקת הוצאה לאור
נובמבר 2001

קוד: ח-026

© כל הזכויות שמורות

למוסד לבטיחות ולגיהות - מחלקת הוצאה לאור

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, להקליט, לתרגם, לאחסן במאגר מידע, לשדר או לקלוט בכל דרך או אמצעי אלקטרוני, אופטי או מכני או אחר - כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה אלא ברשות מפורשת בכתב מהמו"ל.

תוכן העניינים

מבוא

5

פרק א' - מושגי יסוד בתורת החשמל

7

7	המתח החשמלי
7	המעגל החשמלי
9	התנגדות המעגל החשמלי והשפעתו על עוצמת הזרם
10	המבטח ותפקידו
13	כיצד נגרם החישמול

פרק ב' - השפעת זרם החשמל על גוף האדם

17

17	עוצמת הזרם והשפעתו על גוף האדם
18	משך זמן הזרימה והשפעתו
18	מסלול מעבר של הזרם בגוף
18	עבודה בגובה

פרק ג' - שיטות הגנה מפני חישמול

20

20	הארקת הגנה
23	איפוס
26	הגנה בלעדית ע"י מפסק מגן לזרם דלף
29	הפרד מגן
32	זינה צפה (שיטה בלתי מוארקת)
36	מתח נמוך מאוד (מ.נ.מ)
37	בידוד מגן (בידוד כפול)

פרק ד' - דרכים למניעת תאונות

40

40	ביצוע עבודות רק על ידי חשמלאים מורשים
42	שימוש בצידוד תיקני ותקין
42	המיפרט, התקן ומטרותיהם
44	התאמת הצידוד לתנאי המקום
45	ביצוע עבודה לפי התקנות
	שימוש בצידוד חשמלי במקומות העבודה שלא בהתאם
46	לתקנות הבטיחות בעבודה (חשמל)
47	חשיבותה של התחזוקה
49	שמירה על רציפות מערכת צינורות המים

פרק ה' - גורמים לתאונות חשמל

50

50	פירוק צינורות מים
51	שימוש בכבלים מאריכים
52	שימוש במנורות מיטלטלות
52	הוצאת תקע מבית התקע
54	סילוף נתיכים
54	מניעת נגיעה בחלקים חיים חשופים
55	חישמול "קל"
55	מכשירי חימום עם פתילים בעלי מעטה פלסטי

פרק ו' - תאונות עבודה בעבודות חוץ: בבניין, בחקלאות ובהובלה

56	עבודות בניין בקירבת קווי חשמל עיליים ותת-קרקעיים
57	עבודה עם צינורות השקיה
57	קטיף וגיזום עצים
58	עבודה עם מכונות הרמה ניידות
60	נהיגה בכלי רכב עמוסים במיטען גבוה
60	מוליך חשמלי על הקרקע או תלוי באוויר
60	טיפוס על עמודי חשמל

פרק ז' - מפסק מגן לזרם דלף (מפסק פחת, מפסק נגד חישמול)

61	מבנה המפסק ופעולתו
66	בדיקת תקינות המפסק
67	רמת ההגנה של המפסק
67	בחירת זרם ההפעלה של המפסק
68	סימונים של המפסק
68	מקום ההתקנה ואופן ההתקנה
68	דרישות מחייבות להתקנה ולתחזוקה של מפסק מגן לזרם דלף

פרק ח' - שריפות

71	התחממות מוליכים כתוצאה מזרם-יתר ומתנאי סביבה
72	מגעים רופפים
72	פגיעות בבידוד וזרמי דלף לאדמה
73	מניעת התחממות יתר
73	ניצוצות, קשת חשמלית, קצר בין מוליכים
73	חשמל סטטי וברקים

פרק ט' - הטיפול בנפגע

77	ניתוק המתח
77	שחרור הנפגע ממגע עם מקור החישמול
79	החייאה

מבוא

החשמל הוא מקור האנרגיה העיקרי בשירות החברה המודרנית. העולם המערבי איננו יכול יותר לתאר את חיי האדם ללא חשמל. זהו הכוח המניע בכל תחומי החיים: מכונות בבתי החרושת, ציוד של בתי חולים, ציוד ומכשירים ביתיים, תאורה ציבורית וביתית – פנים וחוץ, מחשבים, תקשורת, רמזורים ובעצם כל מה שרק ניתן להעלות על הדעת. אין כיום תחום כלשהו אשר יכול להתקיים ללא חשמל.

החשמל הוא מקור כוח ידידותי, זמין לכל בעולם המודרני, המגביר את עוצמתו של המין האנושי. כוח החשמל הוא ברכה שסכנות בצידה: זרם החשמל עלול לסכן חיים. בדומה לחידושים טכנולוגיים אחרים המשמשים את האדם: המכונית, המטוס, כלים מהירים ועוד, גם כאן – יש להתייחס בכובד ראש לסכנות האפשריות ולנקוט באמצעי המניעה הדרושים. רק כך יהיה השימוש בחשמל מועיל ובטוח.

סכנת החשמל מאופיינת בהיעדר אזהרה מוקדמת מפניה. הימצאות הסכנה מתגלה מאוחר מדי: החשמל איננו נראה לעין, איננו נשמע לאוזן ולא משפיע על חוש הריח. לכן אי אפשר לחוש בו מראש. רק מגע בעצם מחושמל חושפת את הסכנה. גילוי מאוחר מסתיים בחלק מהמקרים בתאונה, אפילו קטלנית, ו/או בשריפה פתאומית.

הסיסמה: תאונות אינן קורות – אלא נגרמות נכונה גם לגבי תאונות עם חשמל. אפשר להפיק את מלוא התועלת מהחשמל ולמזער את פגיעתו. החיים מחייבים אותנו להיות במגע רצוף ותמידי עם מכשירי חשמל שונים, ולכן אנו חייבים להיות מודעים לסכנות, לעשות שימוש נכון בחשמל ולדעת מה לעשות כדי למנוע מעצמנו ומאחרים פגיעה מחשמל.

חוברת זו עוסקת במיוחד בתאונות חשמל במקומות עבודה – במפעלי חרושת, בבניין, בתשתיות ובשדות. היא נועדה בעיקר לפעילי הבטיחות במקומות העבודה: לממונים על הבטיחות, לנאמני בטיחות ולחברי ועדות הבטיחות, אך יכולה להיות לעזר רב לכל אדם אשר מעוניין ללמוד ולהבין את הסכנות שבחשמל ואת דרכי מניעתן.

הנחת היסוד היא שלא מספיק להתריע "אסור" או להכריז "מותר". המשתמש חייב להבין:

■ איך פועלת מערכת החשמל ומהם הסיכונים הטמונים בה;

■ כיצד נסגר מעגל חשמלי דרך גוף האדם בזמן חישמול;

■ מהן שיטות ההגנה, השונות מפני התחשמלות (חסרונות, מגבלות ויתרונות).

רק כאשר המשתמש בחשמל יבין את כל אלה, הוא יוכל לזהות, בקלות יחסית, מקורות של סכנה ולפעול בזמן למען חיסולה.

תנאי האקלים בארץ מגבירים את סכנות החישמול: האקלים החם והלח גורם להזעה רבה והופך את גוף האדם למוליך חשמל טוב. לבוש קל החושף חלקי גוף שונים, מגביר את האפשרות

למגע ישיר בין חלקי גוף חשופים לגופי מכשירים מחושמלים ו/או גופים שיש להם מגע עם המסה של האדמה. כתוצאה מכך גוברת הסכנה של מעבר זרמי חשמל בסדרי גודל מסוכנים דרך גופו של האדם המעורב, עד כדי תאונה קטלנית.

אנו מקוים שרבים ימצאו עניין ויפיקו תועלת מהחוברת. אם נצליח לרתק את הקורא ונגביר את מודעותו לסיכונים הכרוכים בחשמל, כך שינקוט באמצעים להקטנת הסיכון – זה יהיה השכר לעמלנו.

פרק א'

מושגי יסוד בתורת החשמל

כדי להבין כיצד מתרחשות תאונות חשמל וכיצד להישמר מהן, כדאי לרענן כמה ידיעות בסיסיות על החשמל ועל המעגל החשמלי.

אחד מהגורמים הקובעים את גודל הסכנה לחיי האדם המעורב בתאונת חשמל הוא עוצמת זרם החשמל העובר דרך גופו. זרימת חשמל (תנועה מסודרת ומכוונת של אלקטרונים) יכולה להתקיים רק כאשר נוצר מעגל סגור, ואדם יכול להתחשמל רק אם הוא סוגר בגופו מעגל חשמלי.

המתח החשמלי

את המתח החשמלי ניתן להשוות ללחץ הקיים במערכת המים. כדי ליצור זרימת מים במערכת צינורות חייב להתקיים לחץ במערכת. הלחץ נוצר באופן טבעי – כתוצאה מהפרש גובה בין ברז המים ובין מקור המים, או הפרש לחצים מלאכותי – הנוצר ע"י משאבה.

גם לזרימה של זרם במעגל החשמלי חייב להיות "הפרש לחצים" בין שני המוליכים המחוברים למכשיר החשמלי. הפרש הלחצים בחשמל נקרא "הפרש פוטנציאלים" או "מתח", המתח גורם לתנועתם של האלקטרונים מקוטב אחד לקוטב השני של מקור המתח (כלומר: המקור להפרש הלחצים/הפוטנציאלים), דרך המכשיר החשמלי והמעגל החשמלי. המתח נמדד ביחידות הנקראות "וולט".

לפי הכללים להספקת החשמל בישראל, ולפי האמנה של חברת החשמל, מספקת חברת החשמל מתח בערכים הבאים:

■ 230 וולט – במתח חד-פאזי, בין מופע (פאזה) לאפס;

■ 400 וולט – במתח תלת-מופעי (בין הפאזות).

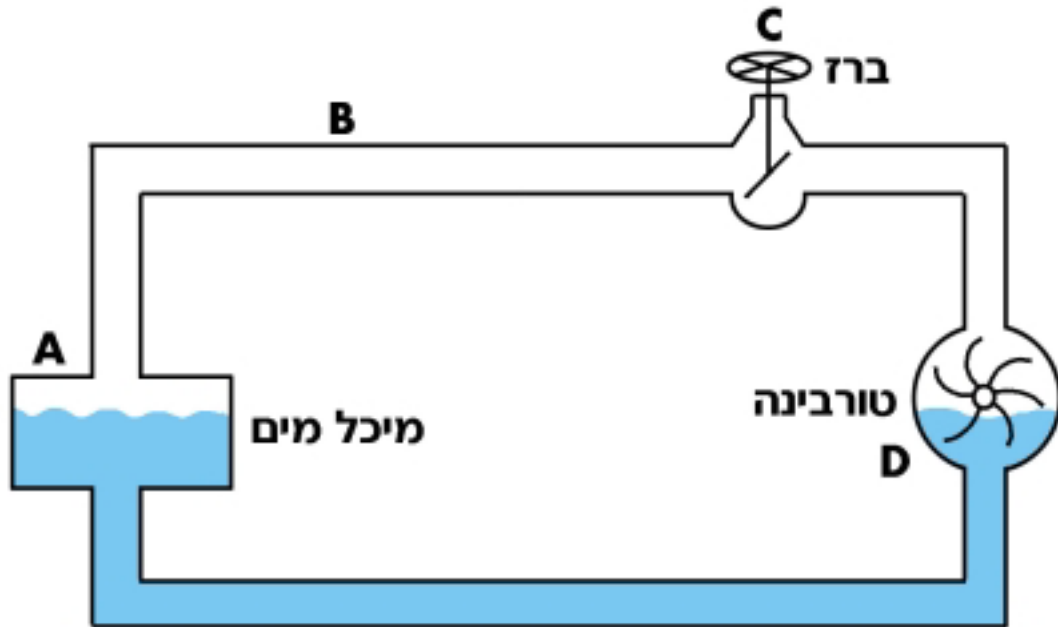
שים לב! המתח המוצהר יכול להשתנות בתחום של $\pm 10\%$ אם קיים במקום ציוד אשר איננו מסוגל לעמוד בשינויים בתחום האמור, יש להתייעץ עם בעל מקצוע כדי להגיע לפתרון.

התקנים הישראליים החדשים שערך מכון התקנים, דורשים שציוד חשמלי יעמוד בתנודות מתח כאלה.

המעגל החשמלי

ניתן להשוות את התנהגותו של זרם החשמל וזרימתו להתנהגותה של מערכת מים במעגל סגור (ראה איור 1). כאשר רוצים להניע טורבינה (D) באמצעות מים, אנחנו יוצרים מערכת מים במעגל סגור המתחילה במיכל מים (A) המחובר באמצעות צנרת (B) – שעליה מותקן ברז (C) – לקצה השני שבו נמצאת הטורבינה (D).

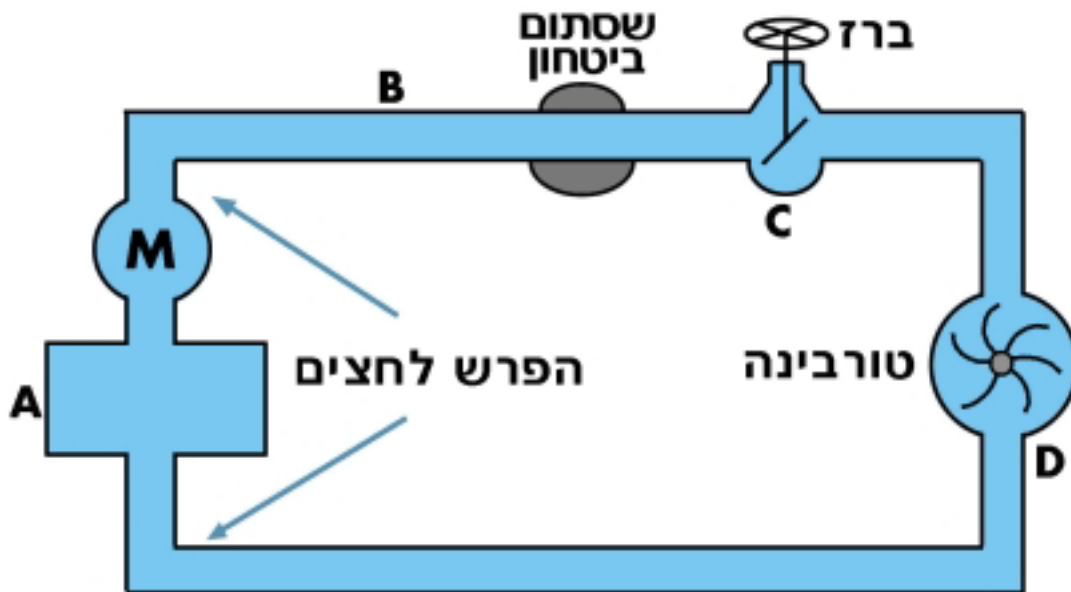
עקרון פעולה של מערכת מים סגורה



איור 1

אם המיכל, הצנרת והטורבינה יהיו בגובה אחד, לא ייווצר הפרש לחצים ולא תתקיים זרימה של מים במערכת הסגורה.

עקרון פעולה של מערכת מים סגורה

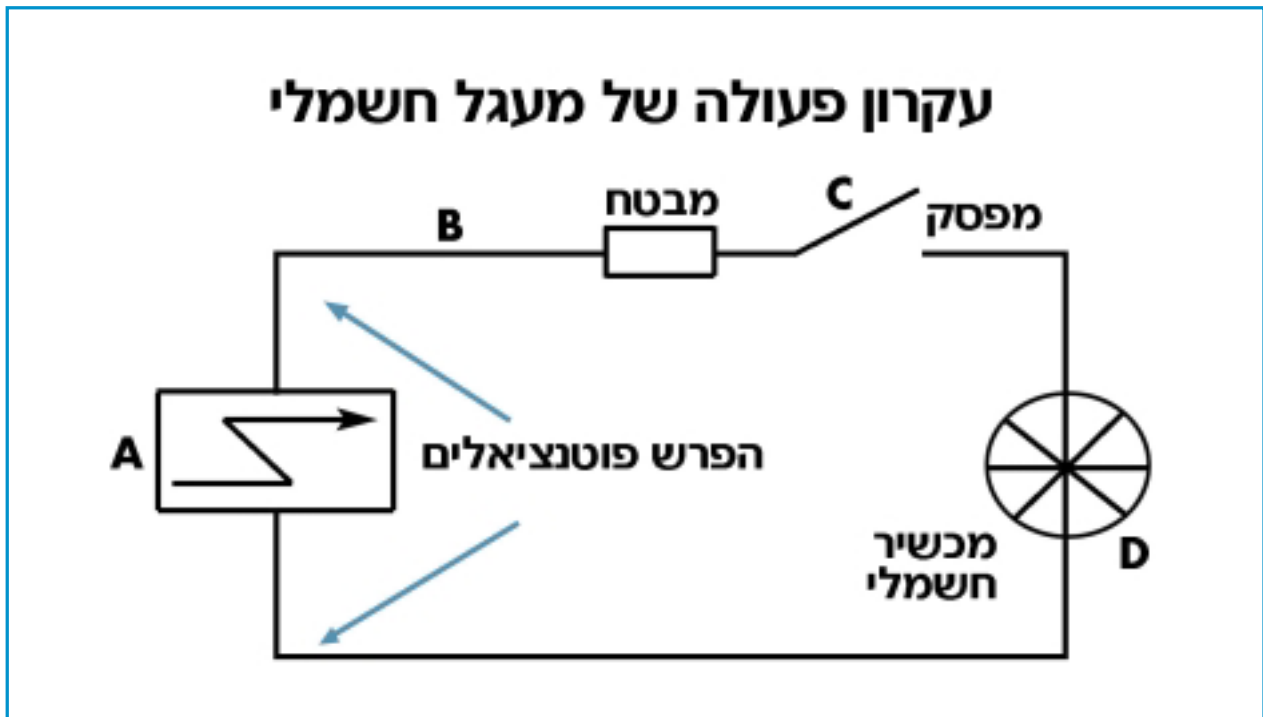


יש הפרש לחצים יש זרימה

איור 2

הדרך לגרום למים לזרום היא ליצור הפרש לחצים במערכת, בין יציאת המים מהמיכל וכניסתם, משני צידי המיכל, ע"י יצירת הפרשי גובה או באמצעות משאבה. במקרה שלנו ניצור את ההפרש באמצעות משאבה (M) (ראה איור 2).

המעגל החשמלי פועל בצורה דומה:



איור 3

במקום מיכל המים קיים מקור של מתח חשמלי (A), כגון: גנרטור, סוללה וכד'; במקום הברז קיים מפסק (C); במקום הצינורות – מוליך חשמל מתכתי, בדרך כלל מנחושת, (B); ובמקום הטורבינה קיים המכשיר החשמלי (D) אותו אנו רוצים להפעיל. (ראה איור 3).

התנגדות המעגל החשמלי והשפעתו על עוצמת הזרם

המעגל החשמלי הוא הנתיב הרצוף של זרימת החשמל ויש לו השפעה ישירה על עוצמת הזרם העובר דרכו.

מהו טיבה של השפעה זו?

נשתמש שוב בדוגמת מערכת המים הסגורה (ראה איור 1). היחסים בין המעגל החשמלי והזרם החשמלי זהים לאלה שבין צינור המים ומעבר המים בהם: ככל שהצינור צר יותר או ארוך יותר – התנגדותו למעבר המים גדולה יותר. ובמושגי החשמל: ככל שקוטר המוליך קטן יותר (נכון לומר: ככל ששטח החתך שלו קטן יותר) או שאורך המוליך גדול יותר – התנגדות המעגל גדולה יותר.

מהי עוצמת זרם החשמל?

עוצמת הזרם היא כמות מסוימת של אלקטרונים (הנמדדת בקולון = coulomb), אשר עוברת דרך מוליך או מכשיר במשך שנייה אחת. מצב כזה מוגדר כמעבר זרם של "אמפר" אחד. גם פה אפשר להציג את ההשוואה עם זרם המים: קיים יחס ישר בין כמות המים העוברת דרך צינור ללחץ השורר במערכת ולקוטר הפנימי של הצינור או, במילים אחרות: יחס ישר ללחץ ויחס הפוך להתנגדות המעבר בצינור (שהיא פונקציה של הקוטר). כך גם בחשמל, שם מקבלים היחסים האלה ביטוי בחוק הנקרא "חוק אוהם", אשר מגדיר את היחסים בין הזרם, המתח וההתנגדות, עפ"י הנוסחה הבאה:

$$I = \frac{U_{(V)}}{R_{(\Omega)}} \quad \text{הזרם באמפרים}$$

לדוגמה: הזרם שיעבור דרך מכשיר שהתנגדותו הפנימית היא 10 אוהם, המיועד לשימוש בארה"ב (המתח שם הוא 110 וולט), יהיה בעוצמה של 11 אמפר:

$$I = \frac{110_V}{10_\Omega} = 11_A$$

דרך מכשיר זהה (בעל אותה ההתנגדות הפנימית), שיחובר למתח בארץ (230 וולט), יעבור זרם של 23 אמפר:

$$I = \frac{230_V}{10_\Omega} = 23_A$$

עוצמת הזרם הזה גבוהה מהזרם שאליו הותאם המכשיר, וכתוצאה מכך המכשיר ישרף.

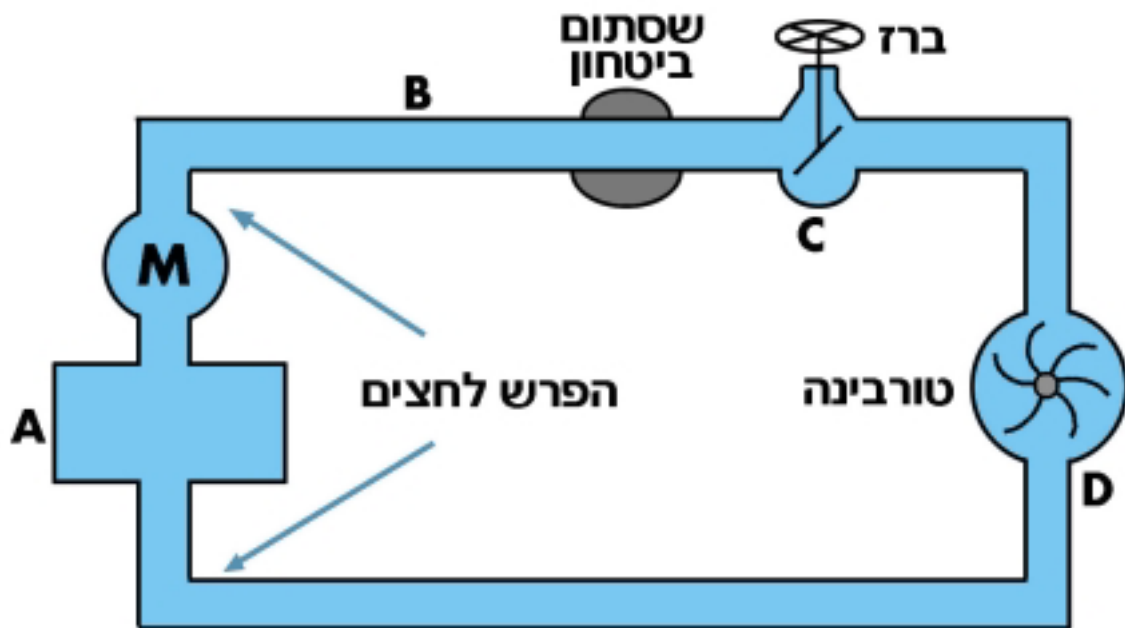
המבטח ותפקידו

"המבטח" או "הנתיך" ("פקק", פיוז = fuse, כפי שנוהגים לכנות אותו), הוא האבזר המשמש לניתוק זרם החשמל במקרים של תקלות מסוג עומס יתר, קצר, או כל תקלה אחרת הגורמת לעלייה של עוצמת הזרם מעבר לערכים המתוכננים והמותרים.

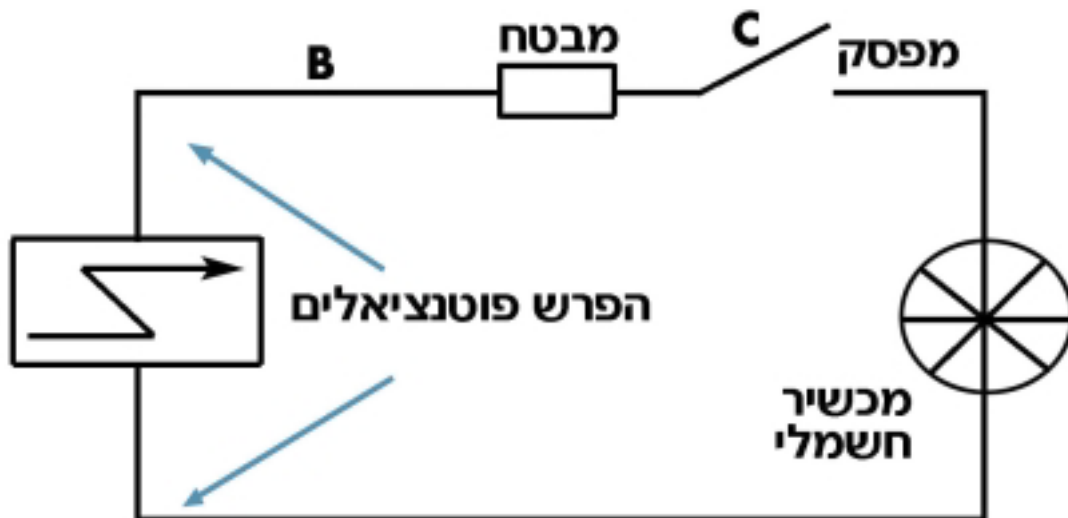
כאשר עובר זרם חשמלי במוליך, הוא גורם להתחממות המוליך. עובדה זאת מנוצלת בכל מכשירי החימום, כגון: תנורים, מגהצים, דוודים לחימום מים וכדומה. אך תופעה זו גם גורמת להתחממות של מוליכים חשמליים אחרים במיתקן. כדי למנוע נזק למיתקן החשמלי ו/או כדי למנוע שריפה במיתקן ובמבנה, צריך לתכנן את המיתקן החשמלי כך שהזרם המירבי שיעבור דרך המוליכים שלו לא יגרום להתחממות יתר, אשר עלולה לגרום לנזק – למוליך עצמו, לבידוד סביבו ולסביבה שבה הוא מותקן.

כדי להסביר את פעולת המבטח, נשווה אותה לתפקידו של שסתום הביטחון במערכות מים: במערכת הספקת מים העובדת תחת לחץ, קיימת סכנה של לחץ יתר. לחץ יתר יגרום לסדיקת הצינור ולפריצת מים בנקודה בה קיים חיבור חלש כלשהו. המים יפרצו החוצה בנקודה החלשה

עקרון הפעולה של המבטח



א. שסתום ביטחון – נקודה המתוכננת החלשה במערכת



ב. המבטח הוא שסתום הביטחון של מיתקן החשמל

איור 4

ביותר באותה מערכת ויגרמו נזק לסביבה וכמובן – למערכת עצמה. אם מעונינים למנוע סכנה כזאת, צריכים להתקין באותה מערכת חוליה חלשה מתוכננת, שתהיה חלשה יותר מכל חוליה חלשה אפשרית במערכת. לחוליה החלשה המתוכננת המותקנת במערכת המים קוראים "שסתום ביטחון" או "שסתום לחץ-יתר" (ראה איור 4א).

אותו עקרון משמש גם להגנה על המעגל החשמלי (ראה איור 4ב). **בתחילת** המעגל מתקנינים חוליה חלשה, שהיא חלשה יותר מכל נקודה במעגל החשמלי עליו היא אמורה להגן. חוליה זו היא ה"מבטח". המבטח מותקן בטור עם מוליך המופע (פאזה), בתחילתו של המעגל, כך שכל הזרם העובר דרך המעגל עובר גם דרכו. אם עובר במוליך "זרם-יתר" (עוצמת זרם גבוהה מ"הזרם המותר" למעבר באותו מוליך), המבטח מזהה את הזרם ומנתק את רציפות המעגל ומונע נזק למיתקן ולסביבתו.

"הזרם המותר" למעבר במוליך מסוים הוא עוצמת הזרם שמותר להעביר במוליך בעל חתך ובידוד מסוימים, במשך זמן רב, מבלי שייגרם נזק למוליך, לבידוד שסביבו או לסביבה שבה הוא מותקן. עוצמת ה"זרם המותר" היא פונקציה של שטח החתך של המוליך, סוג הבידוד סביבו, צורת ההתקנה והטמפרטורה בסביבת ההתקנה.

המבטח הוא אביזר המיועד להגנת מיתקנים מפני "זרם-יתר" (אשר עלול לגרום להתחממות יתר של המיתקן ולנזק). תכונתו זו מנוצלת בצורה עקיפה למטרה נוספת: **הגנה מפני התחשמלות עקב פגם בבידוד, במכשירי חשמל בעלי עטיפה מתכתית מוארקת.** (הפירוט בהמשך).

קיימים 2 סוגים שונים של מבטחים הממלאים את אותו תפקיד באמצעות עקרון פעולה שונה:

■ **נתיכים**

נתיך הוא מבטח הפועל על עקרון של אלמנט ניתך. הנתיך הפשוט בנוי מגוף חרסינה שבתוכו מושחל מוליך דק, הניתך כאשר עובר בו זרם-יתר. בהתכה נוצר מירווח אוויר (המהווה בידוד), והזרם במעגל מופסק. במבטח משוכלל יותר ממולא החלל שבו מושחל המוליך בחול מיוחד, המיועד לספיגת החום שפולטת הקשת החשמלית, אשר נוצרת בזמן הניתוק, ולדיכוי הקשת בנקודת הניתוק. דיכוי הקשת דרוש כאשר נוצר קצר במעגל.

חייבים, תמיד, להחליף נתיך ש"נשרף" בנתיך חדש. אסור לתקן נתיך או לסלף נתיך (לאלתר "סידור" חליפי כלשהו) בכל צורה שהיא.

את הנתיך שהותך יש להחליף בנתיך בעל אותו זרם נקוב וכושר ניתוק, המתאים למעגל בו הוא מותקן. בדרך כלל, רצוי שבמקום בו מותקנים נתיכים יותקנו בלוח סימונים המורים על גודל הזרם הנקוב המירבי של הנתיך, המותר להתקנה באותו מעגל.

■ **מפסקים אוטומטיים**

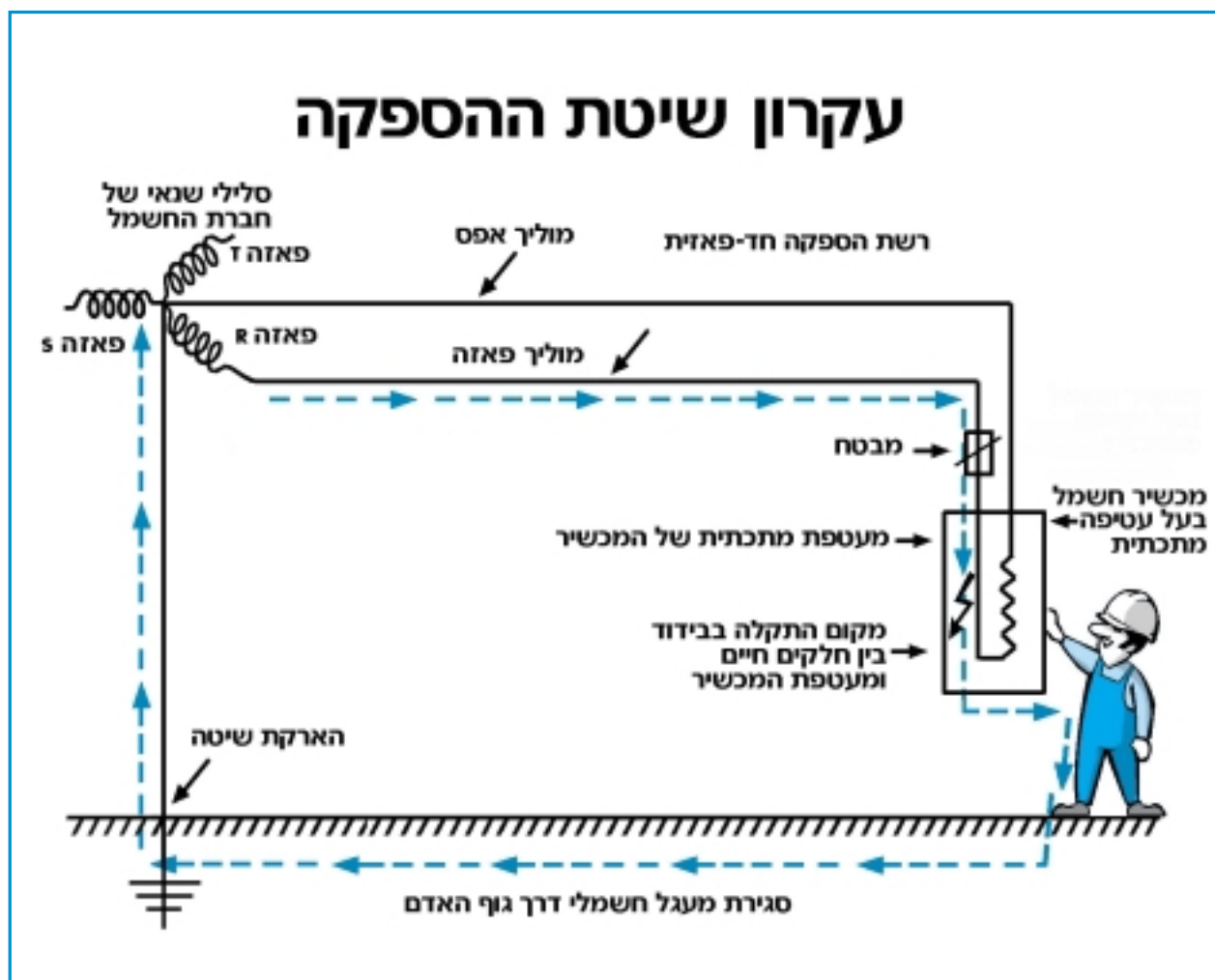
מפסק אוטומטי הוא "מבטח" בצורת מפסק עם מנגנון הפעלה נוסף, מסוג תרמי-מגנטי. כאשר עובר דרכו זרם-יתר הוא מפסיק את הזרם למעגל החשמל. יתרונו בכך שבדרך כלל לא ניתן לסלפו ואין צורך להחליפו אחרי תקלה. כדי להחזיר את הספקת החשמל צריך רק להרים את המתג. לכל אדם, גם למי שאיננו חשמלאי, מותר (על פי החוק) לבצע את הפעולה הזאת, אך לזכור תמיד את הכלל החשוב: **יש לנטרל את מקור התקלה לפני החלפת נתיך שרוף או חיבור מחדש של המפסק האוטומטי.** כלומר: יש לנתק את המכשיר / המיתקן שגרם לתקלה לפני חידוש הזרם.

אי הקפדה על ניתוק המכשיר יכולה לגרום לשריפה (בלוח החשמל או באזור הקצר) ולתאונות קשות, בעיקר במיתקנים בעלי הספקים גבוהים ו/או במיתקנים שצפוייה בהם עוצמת זרם קצר גבוהה (לדוגמה: כתוצאה מקירבה למקור הזינה – השנאי או הגנרטור).

מפסקים אוטומטיים עד לגודל נקוב של 63 אמפר מוגדרים גם כ"מפסק זרם זעיר" ("מ.ז.ז.") או "מפסק אוטומטי מגנטי תרמי" ("מאמ"ת") או בסלנג של החשמלאים "מפסק חצי אוטומטי".

כיצד נגרם החישמול

תאונת חשמל נגרמת כאשר נוצר מצב שבו האדם סוגר דרך גופו מעגל חשמלי. גוף האדם הופך לחלק של המעגל החשמלי. כיצד נגרמות תאונות כאלה? בהתאם לתקנות החשמל, מבוצעת חלוקת החשמל בארץ בצורה המתוארת באיור מספר 5.



איור 5

כאשר החשמל מסופק באמצעות הרשת של חברת החשמל (ח"ח) – המקור המעשי להספקת החשמל הוא השנאי (הטרנספורמטור) של חברת החשמל. במקרים אחרים זהו גנרטור, המותקן במיתקן פרטי, כמקור זרם או כגיבוי למצב של הפסקת חשמל ברשת הארצית.

באזור מספר 5 מופיע רק חלקו המשני של השנאי (החלק המספק את המתח הנמוך). חלק זה מורכב מ-3 סלילי נחושת המלוכפים על גרעין ברזל, ומספקים את המתח ל-3 הפאזות השונות (מסומנים באיור כ- T, S, R, בהתאמה). בין 2 הקצוות של כל סליל קיים מתח של 230 וולט. הסלילים מחוברים יחד, בקצה אחד של כל סליל, לנקודה משותפת (נקודת התווך / נקודת האפס). כך נוצר מצב שבין קצהו החופשי של כל סליל (מופע אחד/פאזה אחת) לקצהו החופשי של סליל אחר (מופע אחר/פאזה אחרת), קיים מתח של 400 וולט (לדוגמה: בין R ל-S), ובין הקצה החופשי של כל אחת מהפאזות לבין נקודת האפס המשותפת קיים מתח של 230 וולט.

4 המוליכים (3 פאזות + מוליך האפס) מהווים את רשת המתח הנמוך של חברת החשמל, אשר ממנה מסתעפים חיבורים שונים, חד-פאזיים או תלת-פאזיים, למבנים השונים (לצרכנים). כדי לפשט את ההסבר מופיעה באיור מספר 5 רשת בעלת מופע אחד (פאזה אחת = חיבור חד-פאזי) וכל הנאמר לגבי מופע (פאזה) אחד, חל גם על הפאזות האחרות.

בהתאם לתקנות החשמל, חובה לחבר את נקודת האפס של מקור הזינה (השנאי או הגנרטור), באמצעות מוליך, לאלקטרודה הטמונה באדמה. החיבור בין נקודת האפס והאדמה מוגדר כ"הארקת שיטה". ביצוע הארקת שיטה גורם לכך שהמתח בן 230 הוולטים, הקיים בין מופע (פאזה) לנקודת האפס, יופיע גם בין המופע (פאזה) לאדמה. זוהי הסיבה לכך שאדם הבא במגע ישיר עם מוליך הפאזה, או עם מעטפת מתכתית של מכשיר עם בידוד לקוי הנמצא תחת מתח, גורם לסגירת מעגל חשמלי דרך גופו לאדמה ומשם – דרך הארקת השיטה – לנקודת האפס שבשנאי.

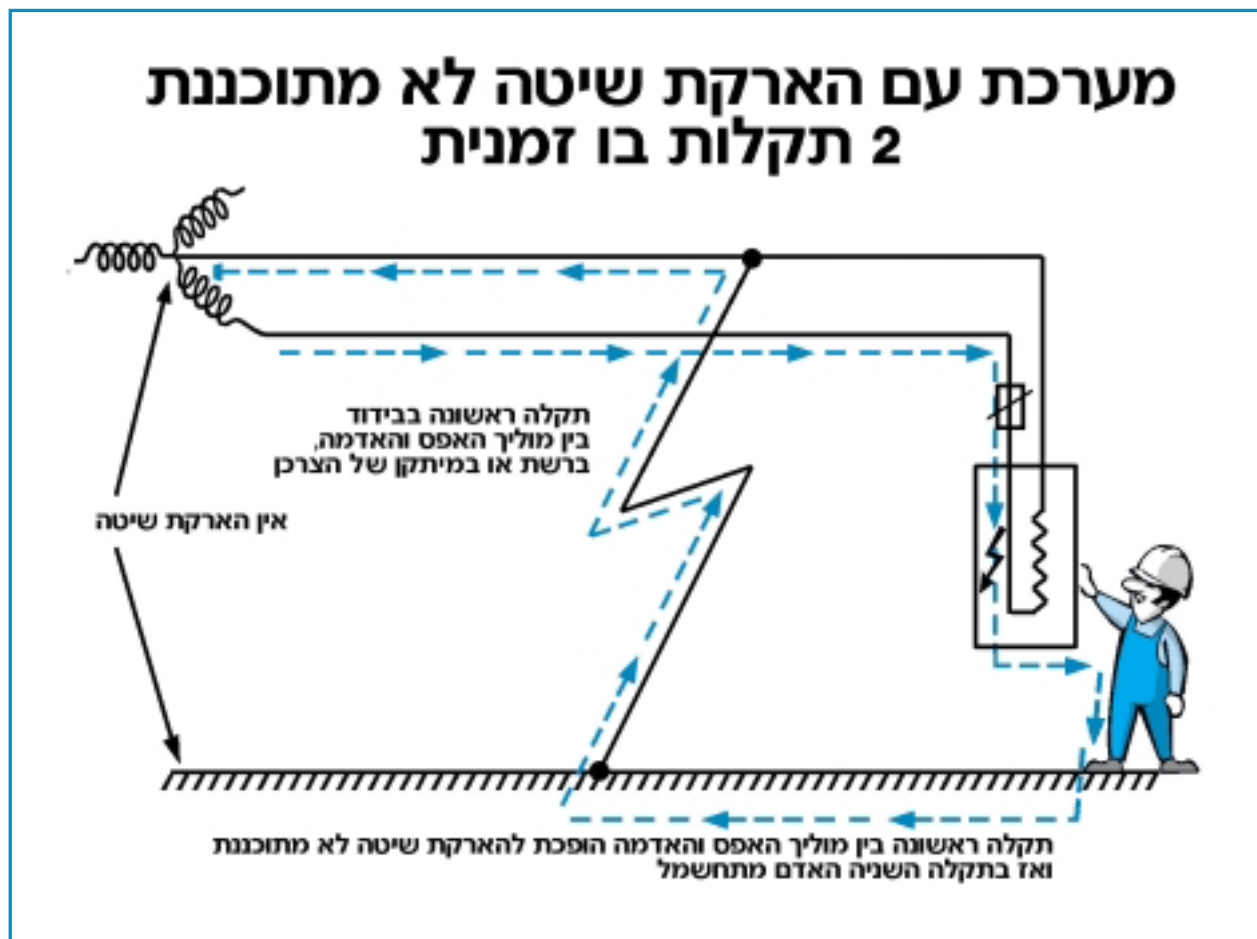
נניח שאדם משתמש במכשיר חשמלי בעל עטיפה מתכתית, שבו התרחשה תקלה והבידוד בין החלקים "החיים" (נושאי המתח) בתוך המכשיר לבין המעטפת נפגע. ברגע שהאדם נוגע במכשיר החשמלי הזה – הוא סוגר בגופו מעגל חשמלי הנקרא "מעגל תקלה". מעגל התקלה הזה מתחיל במופע (פאזה) בשנאי ← רשת ההספקה ← מבטח המעגל ← מוליך המופע (פאזה) ← מקום התקלה בבידוד של המכשיר ← המעטפת המתכתית של המכשיר ← גוף האדם המעורב בתאונה ← האדמה ← אלקטרודת הארקת השיטה ← עד לנקודת האפס בשנאי (ראה איור 5).

המסקנה ברורה: אם הארקת השיטה במקרה שתארנו לא היתה קיימת – לא היה נסגר מעגל והאדם אשר נגע במופע (פאזה) לא היה מתחשמל. המסקנה אמנם נכונה אך פרט למקרים מיוחדים איננה יכולה להתקיים במציאות.

הערה: קיימות שיטות להגנה מפני חישמול המבוססות על היעדרה של "הארקת שיטה" כגון: "שיטת הפרד" ו"זינה צפה", אך השימוש בהן מוגבל.

ככלל, אין אפשרות מעשית להשתמש ב"זינה צפה" (שיטה בלתי מוארקת) ב"רשת חלוקה" (לחלוקת חשמל), הכוללת מספר רב של צרכנים ואלפי מיתקנים ומכשירים, מסיבה פשוטה:

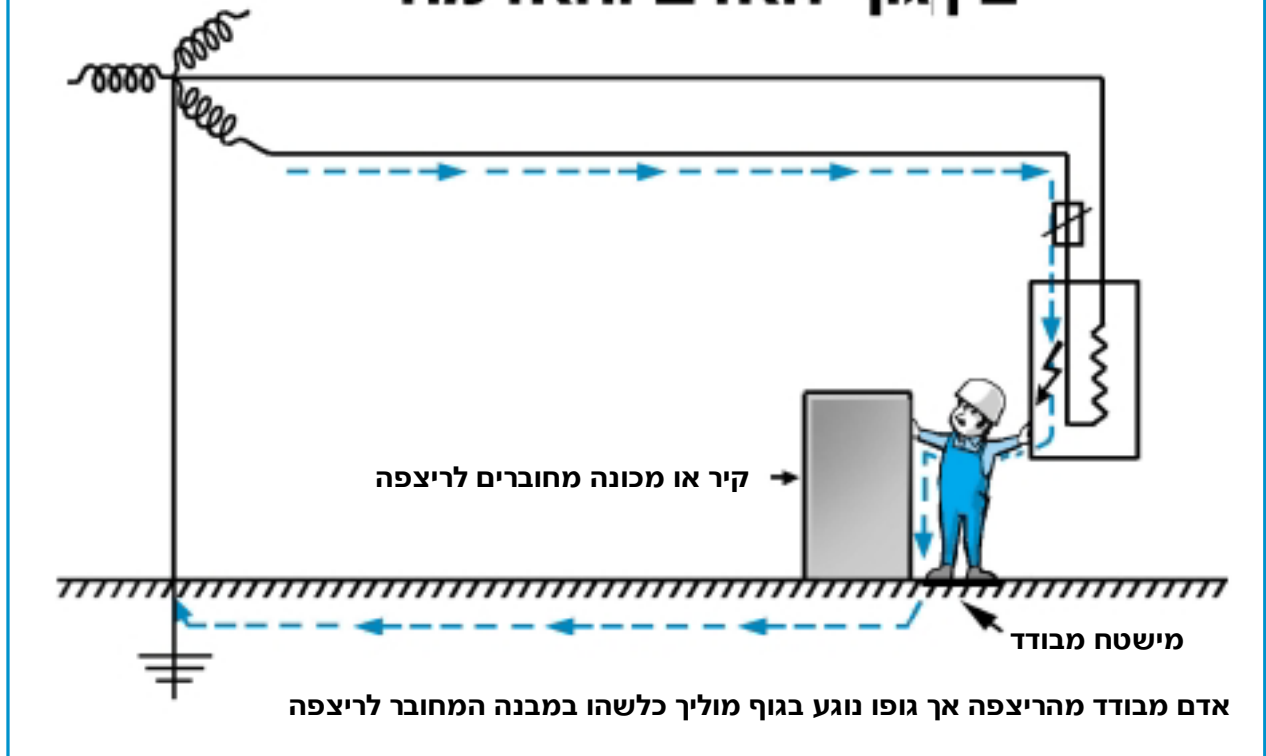
בתקלה הראשונה בבידוד, במקום כלשהו בין אחד המוליכים לאדמה (פאזה או אפס), הופכת שיטת ההספקה הזאת לרשת חלוקה עם "הארקת שיטה", מבלי שקיומה של הארקת השיטה האקראית יהיה ידוע למשתמש. (ראה איור מספר 6).



איור 6

סגירת מעגל לאדמה ע"י גוף האדם יכולה להתרחש ישירות דרך הרצפה, וגם בדרך אחרת: סביר להניח שאדם הנוגע במכשיר החשמלי המקולקל כשהוא נעול בנעליים המצוידות בסוליות גומי, או שהוא עומד על שטיח מחומר מבדד – לא יסגור מעגל דרך הרצפה, מאחר שלסוליות הגומי (יבשות, שלמות וללא מסמרים) יש התנגדות חשמלית גבוהה. אולם, ברגע שחלק חשוף כלשהו מגופו של אותו אדם ייגע בגוף מוליך חשמל אחר, הבא במגע עם האדמה (עמוד, קיר, תיקרה, צינור מים, גוף מתכתי הניצב על הרצפה וכד') – ייסגר המעגל החשמלי דרך גופו, והוא יתחשמל.

חישמול ממגע עקיף בין גוף האדם והאדמה



איור 7

אזהרה: האדם שנעל, במקרה שלנו נעלי גומי, לא סגר מעגל כל עוד גופו לא נגע בחלק אחר הבא במגע עם האדמה, אך אין להסיק שאדם הנועל נעליים בעלות סוליות גומי (מבודד מהריצפה) יכול לגעת ב"מוליך חי" (מוליך הנמצא תחת מתח) מבלי להתחשמל!

אמנם רצוי שהעובדים בחשמל ינעלו נעליים בעלות סוליות מבודדות (ובטיחותיות מבחינת תנאי המקום, המצריכים, לדוגמה, הגנה מפני פגיעות מכניות). אך הנעליים מהוות, בכל מקרה, רק הגנה נוספת, ואינן יכולות לבוא במקום אמצעי ההגנה הרגילים שהחוק וכללי הבטיחות דורשים את השימוש בהם.

המקרים שתיארנו אופייניים ושכיחים בתאונות חשמל. הנסיבות יכולות להיות שונות ומסובכות בהרבה, אך הגורם לתאונה זהה – מעבר זרם חשמל דרך גוף האדם כתוצאה מסגירת מעגל חשמלי.

פרק ב'

השפעת זרם החשמל על גוף האדם

3 גורמים קובעים, ישירות, את מידת הסכנה לחיי אדם בזמן תאונת חשמל:

- עוצמת הזרם העובר דרך גוף האדם בזמן התאונה;
- משך הזמן בו נתון האדם להשפעת זרם החשמל;
- מסלול מעבר הזרם בגוף האדם.

גורם נוסף, עקיף, בתאונות האופייניות אצל חשמלאים, האחראי על מספר רב מאוד של תאונות חמורות, הוא עבודה בגובה ללא אבטחה ע"י חגורת בטיחות – הגורמת לפגיעה מנפילה בזמן חישמול.

עוצמת הזרם והשפעתו על גוף האדם

במחקרים השונים נמצא שגוף האדם מגיב בצורה שונה לעוצמות שונות של זרם חשמל העובר בו. עוצמת הזרם קובעת את חומרת התאונה. לדוגמה:

- **עוצמת זרם של 1 מיליאמפר (0.001 אמפר):** איננה מורגשת כלל ע"י האדם;
- **עוצמת זרם של 2–8 מיליאמפר:** מורגשת אך איננה מכאיבה. האדם עדיין שולט בשריריו ומסוגל לשחרר את עצמו מהעצם המחושמל;
- **עוצמת זרם של 8–15 מיליאמפר:** גורמת לחבטת חשמל מכאיבה, אך קיים סיכוי סביר שהנפגע עדיין שולט בשריריו ומסוגל לשחרר את עצמו מהמגע בחפץ המחושמל;
- **עוצמת זרם של 15–20 מיליאמפר:** גורמת למכה חשמלית מכאיבה. שרירי הגוף מתכווצים והנפגע איננו שולט בהם. אם כף היד שלו לופתת את המכשיר המחושמל – הוא לא יהיה מסוגל לפתוח את היד ולהשתחרר מהעצם המחושמל;
- **עוצמת זרם של 20–50 מיליאמפר:** גורמת להתכווצות חזקה של שרירי הגוף וכתוצאה מכך לנשימה כבדה (התכווצות שרירי החזה גורמת להפרעות בנשימה). אם המצב נימשך לאורך זמן רב הוא עלול לגרום למוות;
- **עוצמת זרם של 50–100 מיליאמפר:** תיתכן הפרעה בפעולת הלב. הקצב הרגיל של פעולות הלב משתבש, הלב מפתח "פירפור חדרים" המביא לשיבוש בהספקת הדם. מצב כזה עלול להסתיים במוות;
- **עוצמת זרם של 100–200 מיליאמפר:** גורמת, תמיד, לפעולה לא סדירה של הלב, ואם לא תופסק השפעתה תוך זמן קצר מאוד – הנפגע ימות;
- **עוצמת זרם הגבוהה מ-200 מיליאמפר:** גורמת להתכווצות חזקה של השרירים, לכוויות חמורות, לשטפי דם ולהריסת הרקמות כתוצאה מהחום שיוצרת עוצמתו של הזרם, בנוסף להתכווצות שרירי הלב (דום-לב) ולהפסקת הנשימה.

העוצמה בה עובר הזרם דרך הגוף נקבעת ע"י 2 גורמים: מתח המגע וההתנגדות גוף האדם דרכו עובר הזרם.

מתח המגע – ברוב המקרים, יכול להיות המתח של רשת ההספקה (בארץ 230 וולט);

ההתנגדות של גוף האדם – משתנה בהתאם לנסיבות וביניהן, לדוגמה, רמת הרטיבות / הלחות של עור הגוף: ההתנגדות עלולה לרדת לאהמים (↓) בודדים כאשר האדם יחף ועומד על ריצפה רטובה בחדר אמבטיה; או לעלות לערכים של 500.000 אהם (↓) ויותר כאשר המקום יבש ואותו אדם נועל נעליים (עור הגוף כשלעצמו איננו גורם משמעותי בהגנה מפני חישמול גם כאשר הוא יבש).

משך זמן הזרימה והשפעתו

הגורם השני בקביעת חומרתה של התאונה הוא משך הזמן בו זורם הזרם דרך הגוף, עד להפסקת אספקת החשמל למעגל או למכשיר הלקוי וניתוק האדם ממקור החישמול.

כאשר אדם נפגע מחשמל, שרירי גופו מתכווצים והאדם עלול לאבד את השליטה על פעולתם.

כאשר אדם מתחשמל כתוצאה ממגע של החלק הפנימי של כף היד בגוף מחושמל – מתכווצים שרירי כף היד והיא נסגרת על הגוף המחשמל, עד כדי כך שהאדם איננו מסוגל לשחרר את עצמו מהמגע. תופעה זו גורמת להארכת משך הזמן בו עובר הזרם דרך גופו של הנפגע ולהגברת הסכנה. התוצאה של תאונה כזאת עלולה להיות קטלנית.

כאשר אדם נוגע בגוף המחושמל בגב היד המצב יגרום, כמובן, להתכווצות שרירי היד והזרם יגרום ל"זריקת" היד ולהרחקת הנפגע מהגוף המחשמל, תוך ניתוק המגע ביניהם.

מסלול מעבר הזרם בגוף

חומרת הפגיעה לגוף האדם מושפעת ישירות מהמסלול בו עובר הזרם בגוף האדם. לדוגמה: כאשר הזרם עובר מכף היד לחלק אחר ביד – יש סיכוי רב שהתאונה תגרום לנזק מקומי בלבד. אך, אם הזרם עובר מכף היד לכפות הרגליים דרך הלב – הקצב הרגיל של הלב עלול להשתבש והוא מתחיל לפרפר (התופעה עלולה לגרום למוות), או ששרירי הלב מתכווצים התכווצות מלאה (דום-לב).

עבודה בגובה

סכנה נוספת, חמורה, בזמן תאונת חשמל היא הסכנה הנובעת מתגובות הגוף לזרם החשמל כאשר העובד מבצע את עבודתו בגובה ונפגע מזרם חשמל. הזרם העובר דרך גוף העובד, גם כשעוצמתו נמוכה, גורם לתגובה של הגוף. התגובה הטבעית של הגוף, ובמיוחד התגובה הלא רצונית של השרירים, עלולה לגרום לכך שאדם יפול ממקום עבודתו על הסולם או העמוד.

אסור לגעת או לטפל במיתקן חשמלי כאשר אתה עובד בגובה, ללא אבטחה ע"י קשירה לריתמת בטיחות, הקבועה לעמוד או לחלק יציב וקבוע במבנה. כלל זה תקף גם כאשר המיתקן מנותק ממקור הזינה.

בארץ התרחשו תאונות רבות כתוצאה מכך שמיתקן, אשר היה אמור להיות מנותק מהזרם, התברר – באיחור – כמיתקן חי, כתוצאה מניתוק המעגל הלא נכון; או מחדירה לא מתוכננת (שגויה, תועה) של זרם לקטע הרשת או למיתקן המופסק. לדוגמה: הזנה מ-2 כיוונים; הפעלת גנרטור חירום והחזרת הזרם לקו המנותק כתוצאה מליקוי במפסק המחליף; כתוצאה מחיבור מכשיר בין מופע (פאזה) מלוח חיוני הניזון מהגנרטור לבין מוליך האפס של הציווד, שחובר בטעות לפס צבירת האפס, בחלק הלא חיוני של הלוח.

תאונות חשמל מזרם "מפתיע" התרחשו גם כאשר זרם החשמל אכן הופסק כנדרש, ועל פי הוראות הבטיחות, כאשר ברשת נוצרה השראה (אינדוקציה) בהשפעת מיתקן לאנטנות שידור של תחנות רדיו, טלוויזיה או מכ"ם המצוי בסמיכות. תאונה כזאת התרחשה בעבר, כאשר עובד נגע במוליך של הרשת שהספקת החשמל אליו היתה מופסקת ו"מקוצרת". "המתח המושרה" – ממשדר רדיו שהיה בקירבת מקום – לא היה מסוכן. הנפגע הצליח, הודות לזרם החלש יחסית, לשחרר את כף היד מאחיזתה בעמוד המחשמל. אך, מאחר שהעובד לא היה מאובטח וקשור בריתמת בטיחות – הוא נפל מהעמוד ונפגע.