

# חשמל סמטי

מאת: מהנדס משה נצר

עורך: מהנדס אבי פנקס

ביקורת מקצועית: ד"ר שאול פלר; אייל צדוק

אחראי הפקה: יעקב צויגהפט

איורים: אוה כהן, ישי אורון

עיצוב גרפי: מוטי קדם

במימון "הפעולה המונעת ומחקר בבריאות ובבטיחות בעבודה" -  
משרד העבודה והרווחה

אוגוסט 2004

קוד: ח-084

חלק גדול מהאיורים בספר זה מבוסס על איורים של:  
Swiss Chemical Industry, 1988. Static Electricity: Rules for Plant Safety

**הערה:** הוצאתה לאור והפצתה של חוברת זו התאפשרו הודות למימון  
'הפעולה המונעת ומחקר בבריאות ובבטיחות בעבודה'  
במשרד התעשייה, המסחר והתעסוקה. ועל כך תודתנו.

© 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.

ISBN 965-490-018-1

## תוכן העניינים

### עמוד

4.....	פתח דבר.....
5.....	פרק ראשון - מבוא לסיכוני פריקה אלקטרוסטטית.....
18.....	פרק שני - סיכוני פריקה אלקטרוסטטית בתעשייה הכימית.....
32.....	פרק שלישי - סיכוני פריקה אלקטרוסטטית בתעשיות הקמח, המספוא ותערובות המזון.....
40.....	פרק רביעי - סיכוני פריקה אלקטרוסטטית בתעשיית הדלק והשמנים ובעת תידלוק.....
52.....	פרק חמישי - סיכוני פריקה אלקטרוסטטית בתהליכים מסחריים ותעשייתיים.....
59.....	פרק שישי - בטיחות פריקה אלקטרוסטטית בתעשייה הבטחונית.....
75.....	פרק שביעי - סיכוני פריקה אלקטרוסטטית במיגזרים נוספים.....
76.....	פרק שמיני - תקנים ומידע.....
78.....	פרק תשיעי - תיאור תאונות כתוצאה מפריקה אלקטרוסטטית.....
82.....	מקורות.....

### נספחים

83.....	סיווג אזורים בהתאם לסיכון היווצרות אווירה נפצה.....
85.....	מילון מונחים.....

## פתח דבר

מאז ומתמיד מלווה החשמל הסטטי בפך של מסתורין. כמעט כל אחד חווה מגע איתו, אך רק בודדים מוכרים כמומחים בתחום. מומחים אלה טוענים, שככל שהם לומדים יותר - הם נוכחים לדעת שבנושא מורכב זה, רב הנסתר על הגלוי. בספר שלפניכם, אנו מנסים להסיר מסך מעל לתחום, לקרב את הציבור לנושא החשמל הסטטי, לפרט את הסיכונים שהתופעה צופנת ולהציג פתרונות ודרכים למיזעור סיכונים אלה.

בברכה



מ. שורץ  
מנהל המוסד  
לבטיחות ולגיהות

## מבוא לסיכוני פריקה אלקטרוסטטית

פריקה אלקטרוסטטית - בקיצור: פא"ס או בכינוי הפופולרי "חשמל סטטי", היא מעבר של ניצוץ חשמלי בין שני גופים, הטעונים במיטענים חשמליים נוגדים: פלוס (+) ומינוס (-). כאשר הניצוץ פורץ בתוך סביבה דליקה או נפיצה הוא עלול לגרום לשריפה או לפיצוץ.

### הצתת חומרים מסוכנים עקב פריקה אלקטרוסטטית

כאשר פריקת מיטענים אלקטרוסטטיים איננה מבוקרת היא עלולה לגרום לדליקה ו/או לפיצוץ. סיכון כזה קיים במעבדות ובמפעלים שבהם מייצרים או מטפלים בחומרים רגישים לפריקה אלקטרוסטטית, כגון: חומרי נפץ, דלק, כימיקלים אורגניים, אבקות אורגניות ומתכתיות, גזים ואירוסולים דליקים וסיבים אורגניים. להלן רשימה חלקית של מיגזרי תעשייה ומוסדות שבהם עלולה להיווצר הצתת של חומר מסוכן:

- בתי-חולים - הצתת אדי תרופות בחמצן;
- תעשיות הדלק והשמנים - הצתת אדי דלק וממיסים;
- ספנות ותחבורה (מיכליות להובלת דלק וכימיקלים) - הצתת אדי דלק וכימיקלים;
- אלקטרוניקה - הצתת ממיסים וגזים דליקים; הרס רכיבים ו/או מעגלים מודפסים;
- תעשיית הטקסטיל - הצתת סיבים של צמר, כותנה וסיבים סינתטיים;
- תעשייה ביטחונית - הצתת חמרי נפץ ופירוטכניקה, הצתת כימיקלים;
- תעשיית הפלסטיקה - הצתת כימיקלים, אבקות אורגניות וגזים דליקים;
- מכוני תערובת וטחנות קמח - הצתת אבק של מוצרים חקלאיים ("אבק חקלאי");
- תעשיית העץ - הצתת נסורת ואבקת עץ.

הסכנה הטמונה בפריקה אלקטרוסטטית גדולה במיוחד, משום שהיא איננה גלויה לעין. רק היכרות עם תהליך ההיווצרות של פא"ס, עם התנאים המאפשרים אותה ועם הסביבה הנוטה לשריפה או לפיצוץ, עשויים לאפשר נקיטת צעדי מניעה. להלן רשימת מקרים של פיצוץ אבקת מספוא אשר התרחשו במכוני תערובת, טחנות קמח, ממוגורות וכיו"ב:

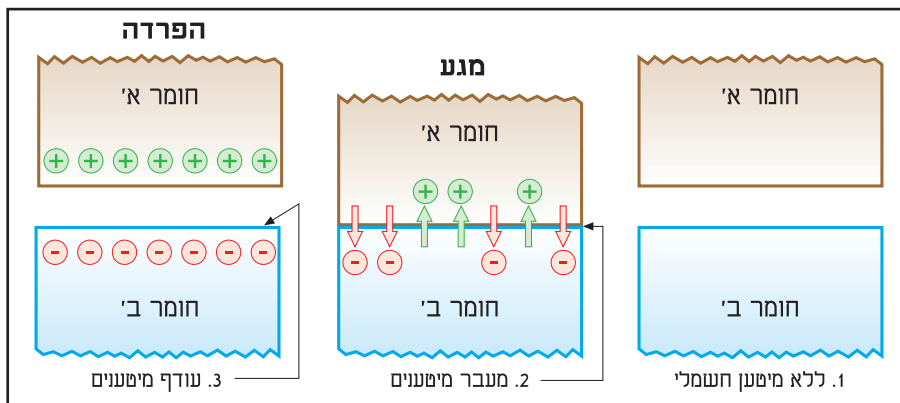
- 1945 - קנדה: ממוגורות מספוא בנמל ארתור, אונטריו. 22 הרוגים, ו-27 פצועים.
- 1970 - נורבגיה: סילו לאחסון גרעיני מספוא מיובאים.
- 1975 - קנדה: ממוגורות מספוא בוונקובר. 5 הרוגים ו-5 פצועים.
- 1979 - גרמניה: 4 טחנות קמח. 14 הרוגים ו-50 פצועים.
- 1980 - רוסיה: טחנות קמח בעיר קלינין. 10 הרוגים ו-5 פצועים.
- 1982 - צרפת: מיבשלת בירה (פיצוץ אבקת לתת) בעיר מץ. 12 הרוגים ו-5 פצועים.
- 1982 - מרוקו: טחנת קמח בעיר רבט. 6 הרוגים ו-20 פצועים.
- 1985 - ארגנטינה: ממוגורות מספוא בנמל באיה-בלנקה. 22 הרוגים ופצועים רבים.
- 1987 - סין: פיצוץ אבק סיבי טקסטיל בעיר חרבין. 58 הרוגים ו-177 פצועים.
- 1979-1990 - ארה"ב: 213 מקרים של פיצוץ "אבק חקלאי". מספר רב של הרוגים ופצועים.

גם בארץ אירעו תאונות כתוצאה מפריקה אלקטרוסטטית, בחלקן עם נפגעים, לעתים - פגיעות קטלניות.

## היוצרות מיטענים אלקטרוסטטיים

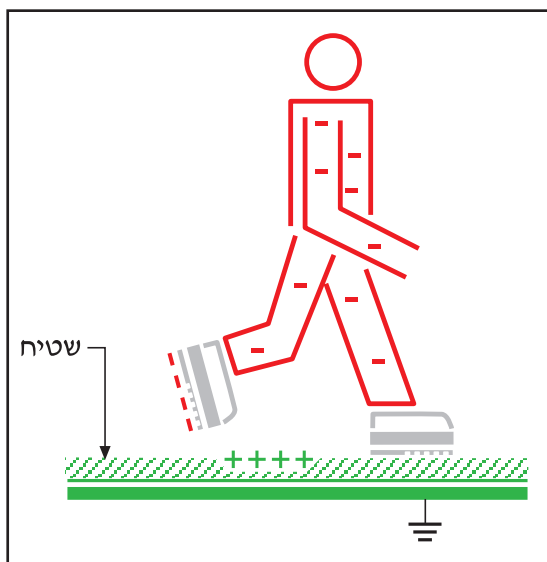
### מוצקים

כאשר שני חומרים שונים - א' ו-ב' - באים במגע, מתקיים מעבר אלקטרוני מ'א' לחומר 'ב'. כתוצאה מכך נוצר בחומר 'ב' עודף מיטענים שליליים וב-א' - חוסר מיטענים שליליים, שפירושו טעינה חיובית - (ראו איור 1).



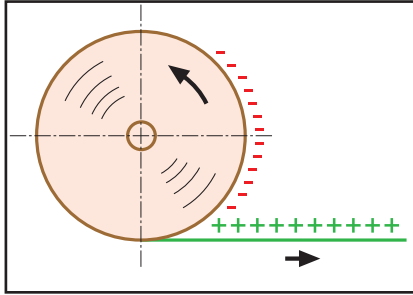
איור 1: היוצרות חשמל סטטי במוצקים

אם מרחיקים את שני החומרים זה מזה - לכל אחד מהם יהיה מיטען חשמלי באותה כמות אך בקיטוב הפוך. זוהי המשמעות של טעינה אלקטרוסטטית. אם שני החומרים הם מוליכים, לדוגמה: שתי מתכות, המיטענים הנוצרים זורמים מיד בין המתכות ובתוך ומנטרלים (מונעים) את הצטברות עודף המיטען. לכן, בהפרדה מלאה לא ייווצרו מיטענים עודפים משמעותיים.



כלומר: מיטענים משמעותיים ייווצרו רק אם אחד החומרים אינו מוליך. בתהליך כזה ניתן להתייחס לגוף האדם כמוליך. בחשמל סטטי נעשה שימוש נרחב במונח "התנגדות נפחית", אשר יוסבר בהמשך.

איור 2: כאשר אדם נעול נעליים בעלות סוליות מבודדות צועד על שטיח ניילון או על רצפת פלסטיק - גופו נטען במיטען סטטי. הסוליות המבודדות מקשות על פיזור המיטענים

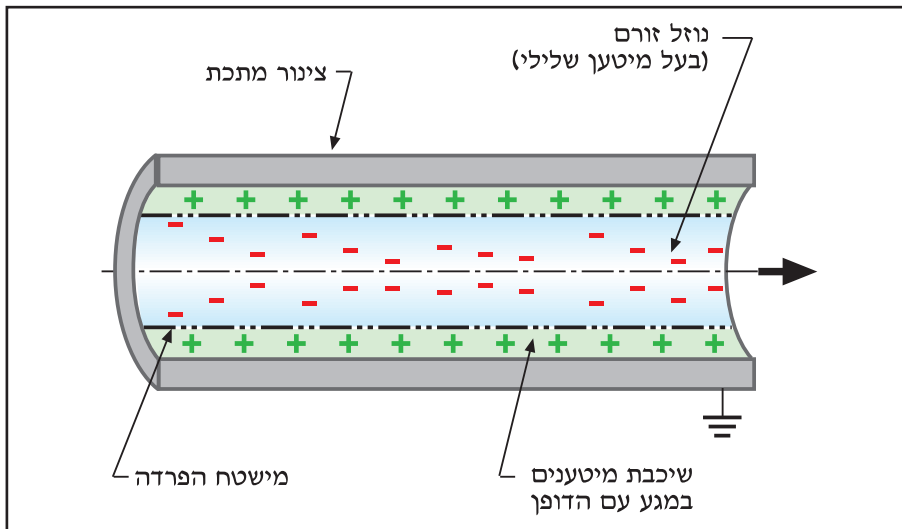


איור 3: סרט נייר או פלסטיק עובר בגלילה על תוף סובב. הסרט והתוף נטענים

כאשר מדברים על זרם חשמלי, משתמשים במונח המוכר יותר: "התנגדות חשמלית", המתייחסת לתיל דרכו זרם החשמל. התנגדות חשמלית תלויה בחומר שממנו עשוי המוליך. היא נמוכה במוליכים מנחושת, לדוגמה, וגבוהה בנגדים חשמליים. בהיווצרות של חשמל סטטי יש טעינה של גוף בעל נפח. הן בשעת הטעינה והן בשעת הפריקה, האלקטרונים זורמים דרך הנפח כולו, ולכן מדברים על התנגדות נפחית. גם לגבי חשמל סטטי ניתן להבחין - בהתאם לחומר - בין מוליכים ומבודדים. כל המוצקים שהם בעלי התנגדות נפחית גבוהה מעשרה מיליארד ( $10^{10}$ ) אוהם x ס"מ נחשבים כמבודדים.

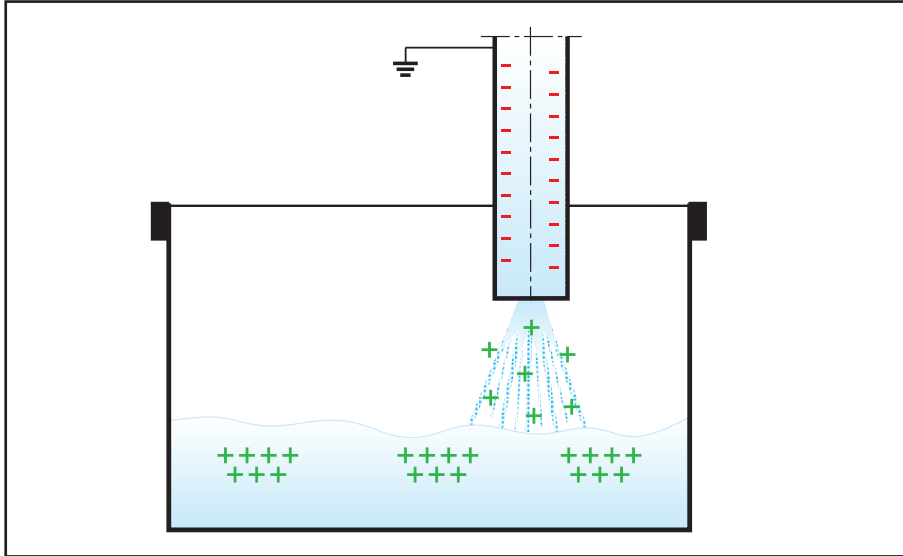
## נוזלים

מנגנון הטעינה בנוזל שונה מזה שבגופים מוצקים. בתוך נוזל קיימים יונים (מולקולות טעונות), חלקם חיוביים וחלקם שליליים. לפי תיאוריות מודרניות, יונים בעלי סוג אחד של מיטען (חיובי או שלילי) יסופחו אל מישטח של גוף מוצק. אל שיכבת היונים הזאת ייצמדו יונים בעלי מיטען נגדי - (ראו איור 4).

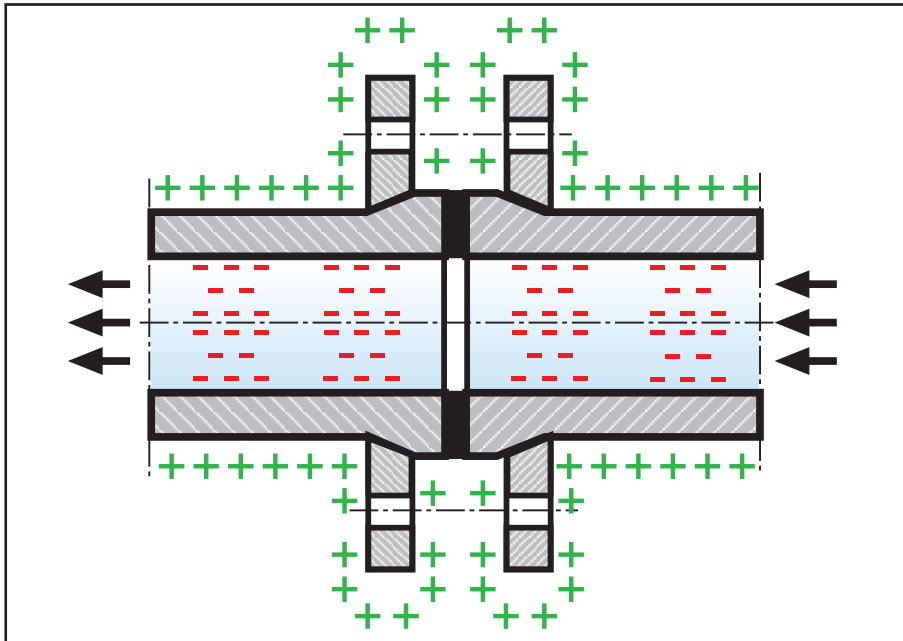


איור 4: היווצרות חשמל סטטי בנוזלים

השיכבה השניה בצידו הפנימי של הצינור באיור 4 מכילה יונים חיוביים. בחלקו המרכזי של הצינור יזרום הנוזל ובתוכו מיטענים נוגדים לחיוביים (כלומר: שליליים). נוזל בעל התנגדות נפחית גבוהה מ- $10^{10}$  אוהם/ס"מ, הזורם בצינור, נטען בחשמל סטטי. בנוזל מוליך, לעומת זאת, נוצר איזון של המיטענים בתוך הנוזל הזורם וצינור ולא תהיה טעינה אלקטרוסטטית.

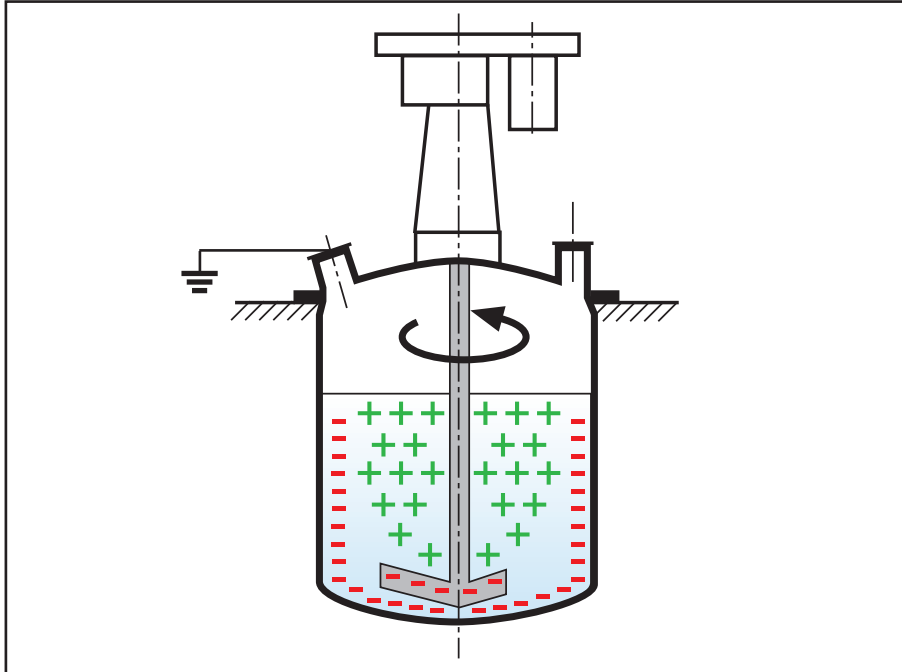


איור 5: נוזל בלתי מוליך זורם דרך צינור מתכת מוארק. מיטענים עודפים שבצינור המתכת זורמים לאדמה, דרך ההארקה. המיטענים הסטטיים היוצאים מהצינור עם הנוזל נצברים בבריקה הנוצרת במיכל



איור 6: טעינה אלקטרוסטטית של אבקה או נוזל בעת מעבר בצינור לא-מוליך. החומר, הצינור והאוגנים נטענים במיטען אלקטרוסטטי

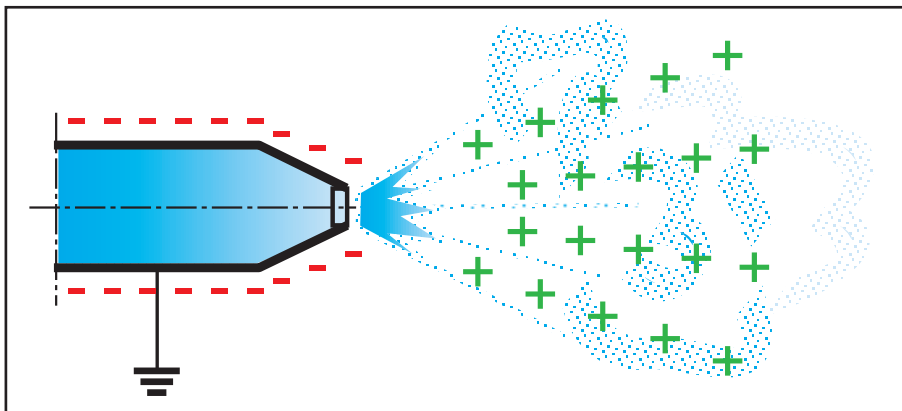




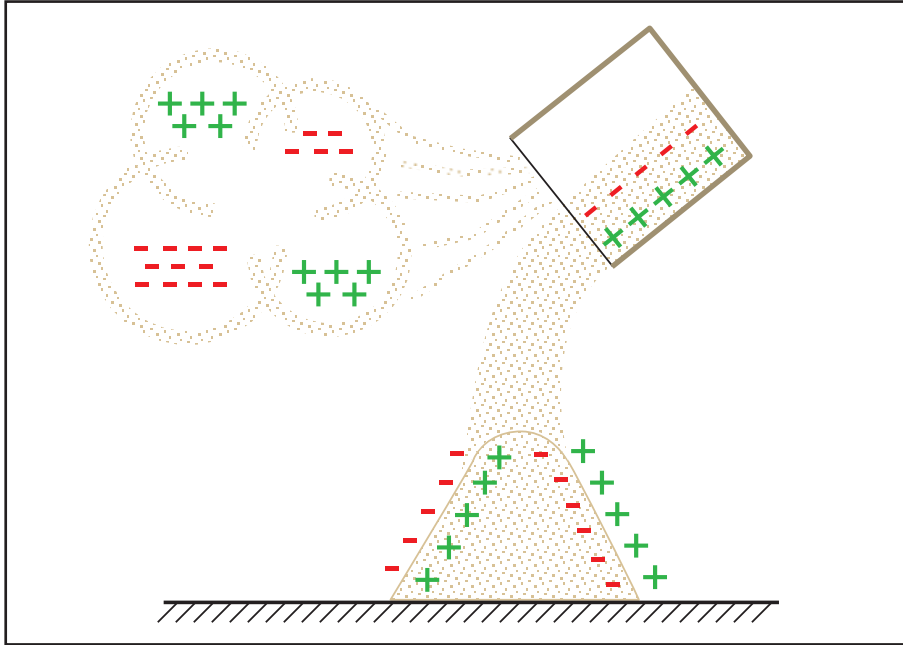
איור 7: טעינה אלקטרוסטטית של אבקה או נוזל בעת עירבובם במיכל. הנוזל, הבוחש והמיכל נטענים במיטען אלקטרוסטטי

## גזים, אירוסולים ואבקות

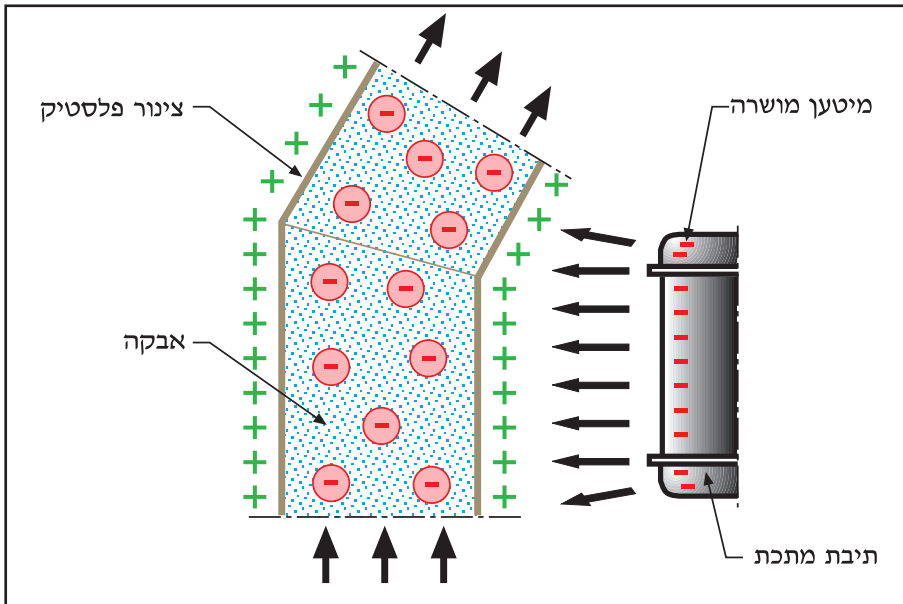
גזים ללא חלקיקי מוצקים או חלקיקי נוזלים אינם נטענים במיטען סטטי. לעומת זאת, קיטור ואירוסול המשתחררים ממכל לחץ עשויים ליצור מיטען סטטי רב.



איור 8: היווצרות מיטען סטטי באירוסול. המיטען הסטטי של פיית הריסוס המתכתית מוארק. טיפות האירוסול טעונות במיטען אלקטרוסטטי



איור 9: טעינה אלקטרוסטטית של אבקה בעת שפיכתה מאריזה בלתי מוליכה. האריזה, האבקה ועננת האבק נטענים במיטען אלקטרוסטטי



איור 10: השראה אלקטרוסטטית. זרימת האבקה דרך צינור פלסטיק טוענת את שניהם. המיטען של הצינור יגרום להשראת מיטענים על תיבת המתכת הנמצאת במרחק קטן ממנו

## תופעת הפריקה האלקטרוסטטית

פריקה אלקטרוסטטית היא תופעה טבעית ושכיחה, המלווה את קיומנו בחיי היום-יום. ניתן לחוש בתופעה דרך מופעיה השונים: ברקים, חבטות פריקה אלקטרוסטטית לאדם, פא"ס מריהוט וממכשירים, פא"ס בכלי טייס ועוד. המיטען האלקטרוסטטי (א"ס) והשדה החשמלי הסטטי מנוצלים לתועלת האדם, כגון במכונות צילום, בקולטי אבק ופיח, בגילוי מתכות ובשימושים רבים נוספים. לתופעת הפריקה האלקטרוסטטית יש, למרבה הצער, גם היבטים שליליים ידועים:

- בטיחות: גרימת פיצוצים או דליקות עקב פריקה אלקטרוסטטית דרך חומרים מסוכנים כגון כימיקלים, אבקות, דלק, חומרי נפץ, פירוטכניקה (אבק שריפה) וכיו"ב.
- אמינות: גרימת נזק למעגלים ולרכיבים אלקטרוניים (השמדת רכיבים ופגיעה באיכות המוצר ובאמינותו).

בספר זה נציג מספר עקרונות יסוד הקשורים בבקרת פריקה אלקטרוסטטית, למניעת סכנת פיצוץ או דליקה בטיפול ובעבודה בחומרים מסוכנים.

## ההיסטוריה של הטיפול בהיבטי הבטיחות של פריקה אלקטרוסטטית

המודעות לבעיית הבטיחות המלווה פריקה אלקטרוסטטית הופיעה כבר במאה ה-18. בניסוי מפורסם לכד בנג'מין פרנקלין (1749) ברק באמצעות עפיפון, שהוארק אל האדמה על-ידי תייל מתכת. פרנקלין הוכיח שהברק הוא בעצם פריקה אלקטרוסטטית רבת-עוצמה. ניסוייו הביאו את המדינאי והמדען המפורסם להמצאת כליא-הברק הקרוי על שמו "מוט פרנקלין". זהו מוט המותקן על מבנה, לוכד את הברק ומוביל את הזרם שלו לאדמה מבלי לפגוע במבנה המוגן. בהיבט ההיסטורי, הזיקה הראשונה שנוצרה בין "פריקה אלקטרוסטטית" לבין "סיכון" ו"בטיחות" קשורה בתופעת הטבע "סערות ברקים", אשר עלולה לגרום להרס רב ולפגיעה בבני אדם ובבעלי חיים. לפי הסטטיסטיקה, בארצות-הברית נהרגים כ-100 איש בשנה מפגיעת ברק!

במשך 300 השנים האחרונות נחקרו ותועדו תאונות בתעשיית החומרים המסוכנים: מפעלי תחמושת, טחנות קמח, ממגורות דגנים, מפעלי כימיקלים ועוד. בחלק מהתאונות סברו החוקרים שהאנרגיה החשמלית המלווה פריקה אלקטרוסטטית מאדם, ציוד ורהיטים היא שגרמה לדליקה או לפיצוץ. פעילות ממשית לפיקוח על פריקה אלקטרוסטטית בתעשיית ייצור ה"אבק השחור" (מונח מקובל לאבק שריפה שצבעו שחור) החלה להתבצע במלחמת העולם הראשונה ולאחריה. כימאים ומהנדסי חומרים עשו מאמצים רבים להקטנת רגישות ההצתה של חומרים מסוכנים. ואכן, במקרים רבים עלה הדבר בידם - התעשייה ומוסדות שונים החלו לייצר ולהשתמש בחומרים אדישים לפריקה אלקטרוסטטית ולמקורות הצתה אחרים. שתי דוגמאות בולטות: אבק שריפה שחור בתעשיית התחמושת, ולהבדיל, חומרי הרדמה בחדרי ניתוחים.

משנות ה-60 ואילך, כתוצאה ממהפיכת המיקרו אלקטרוניקה (המיזעור של מעגלים משולבים בטכנולוגיות של חצאי מוליכים וירידת צריכת ההספק החשמלי של הרכיבים) גברה סכנת הפגיעה ברכיבים אלקטרוניים על-ידי פריקה אלקטרוסטטית. נוצר צורך למסד את הטיפול בבקרת החשמל הסטטי, לא רק כהליך לשיפור הבטיחות אלא בעיקר לשיפור אבטחת איכות המוצר.

## עקרונות יסוד בבטיחות חשמל סטטי

- הוראות הבטיחות בחשמל סטטי נגזרות מ-2 עקרונות יסוד:
- צמצום ומיזעור הסיכון ומנגנון הפעלתו.
  - בהתרחש אירוע - מיזעור תוצאותיו כדי שלא יהיו נפגעים, וכדי שהנזק שייגרם למיתקנים יצומצם עד כמה שאפשר.
- יישום מוצלח של שני עקרונות אלה דורש פעולה, בו-זמנית, במספר מישורים, כמפורט להלן:
- מניעת צבירתם של מיטעני חשמל סטטי על גבי גופים מוליכים, על-ידי הארקתם.
  - מניעת פריקה אלקטרוסטטית על-ידי גישור בין רכיבים מוליכים, כאשר אין אפשרות למנוע היווצרות מיטענים אלקטרוסטטיים, לדוגמה בכלי-טייס. גישור כזה יוצר מערך שווה פוטנציאל.
  - צמצום הרגישות והכמות של חומרים/רכיבים דליקים או פציצים במקום העבודה.
  - הקטנת מספר האנשים המורשים לשהות במקום עבודה עתיר סיכון.
  - התקנת אמצעים לשחרור מהיר ומבוקר של גלי הלם (פיצוץ) ולכיבוי אוטומטי של דליקה.
- שני האמצעים הראשונים מכוונים לענות על עקרון הבטיחות הראשון - צמצום האיום. שלושת האמצעים האחרונים מיועדים לענות על עקרון הבטיחות השני - צמצום הנזק, אם יתרחש אירוע.

## עקרונות פיקוח על פריקה אלקטרוסטטית

- כפי שכבר הוסבר, מיטען אלקטרוסטטי נוצר כתוצאה מחיכוך והפרדה בין שני חומרים שונים. הואיל וזהו תהליך טבעי בכל מקום שיש בו תנועה וחיכוך בין חומרים, לא ניתן למנוע היווצרות מיטענים אלקטרוסטטיים.
- מיטען א"ס נוצר גם עקב השראת שדה חשמלי, לדוגמה: כאשר ענן טעון חולף מעל גופים מוליכים בלתי מוארקים.
- נגדיר את מיכלול האמצעים הדרושים למניעת תאונות ונזקים מפריקה אלקטרוסטטית כ"בקרת מיטענים אלקטרוסטטיים". ניתן להפעיל בקרת מיטענים אלקטרוסטטיים ב-2 שיטות עיקריות:
- מניעת טעינה אלקטרוסטטית של גופים**, המצויים בקרבת חומרים מסוכנים או רכיבים רגישים. מיטען אלקטרוסטטי הנאחז בגוף מבודד, או מיטען א"ס הנצבר במוליך, יוצרים סביבם שדה חשמלי. עוצמתו של השדה החשמלי נמדדת ביחידות של וולט למטר (V/m). כאשר עוצמת השדה האלקטרוסטטי מגיעה לכמה אלפי וולט למטר, האוויר מתייבן (מתמלא ביונים - מולקולות של גז הנושאות איתן מיטען חשמלי), התנגדותו החשמלית קורסת, ומיטען אלקטרוסטטי יתפרק מגוף א' אל גוף ב' דרך האוויר. בגמר התהליך, שני הגופים יהיו בעלי אותו פוטנציאל. הפוטנציאל המשותף יהיה נמוך מזה שהיה לגוף הטעון במיטען האלקטרוסטטי אשר גרם לתהליך מעבר המיטען.
- מניעת פריקה אלקטרוסטטית דרך אווירה דליקה או נפיצה, או מניעת אווירה נפיצה בנתיבי הפריקה האלקטרוסטטית בין שני גופים טעונים.**
- משתמשים בשיטה זו כאשר אין אפשרות למנוע את הטעינה. לדוגמה: בכלי-טייס או בגופים מתכתיים שאין כל אפשרות להאריקם.
- לא קיימת אפשרות למנוע את היווצרותם של מיטענים אלקטרוסטטיים ולכן לא קיימת שיטה שלישית - "מניעת יצירת מיטענים אלקטרוסטטיים". מניעה כזו איננה אפשרית מבחינה פיזיקלית.

## מניעת טעינה ופריקה אלקטרוסטטית

### טעינה אלקטרוסטטית

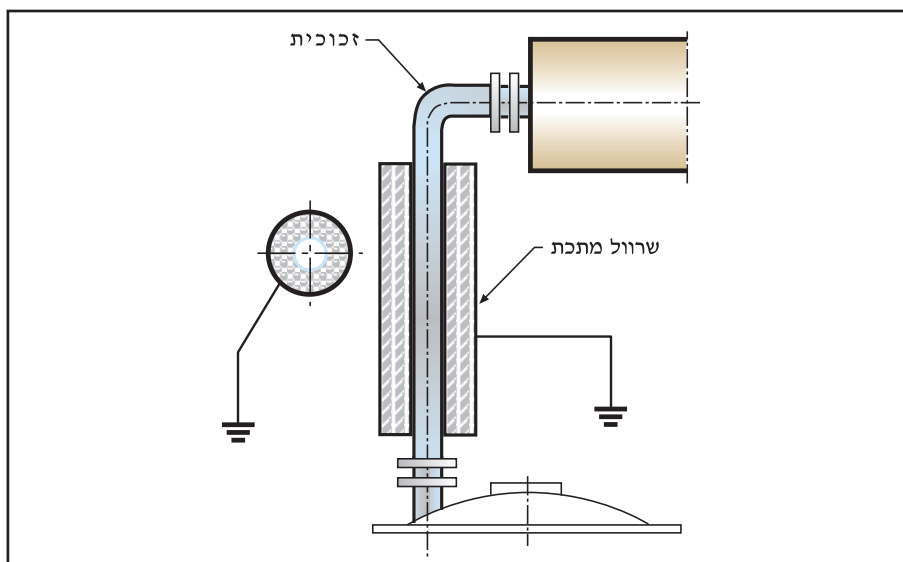
מיטענים א"ס נוצרים בתהליך חיכוך בגופים מבודדים ומועברים לתוך גופים מוליכים בלתי מוארקים. בגופים כאלה תיתכן צבירה משמעותית של מיטענים סטטיים הודות לקיבול החשמלי הגבוה שיש למוליך. גודלו של המיטען האלקטרוסטטי תלוי בקיבולו החשמלי של הגוף המוליך. גם המיטען האלקטרוסטטי הנצבר במוליך עשוי לגדול ככל שהקיבול גדול יותר. יחידת הקיבול החשמלי היא "פֶּרַד" (Farad), אך מכיוון שהיא מייצגת קיבול גדול מאוד, משתמשים ב-pF = פיקו פרד.  $1 \text{ פרד} = \text{מיליון מיליונים פיקופרד} (1 \text{ Farad} = 10^{12} \text{ pF})$ .

**לדוגמה:** מיטען אלקטרוסטטי נוצר בביגוד סינתטי ומועבר לגוף האדם הלוכש בגדים כאלה. גוף האדם עשוי מחומר מוליך חשמל ומהווה קבל חשמלי משמעותי (150-400pF). נעליים בעלות סוליות מבודדות חשמל, כגון סוליות גומי, מונעות הארקה אדם לאדמה. אדם הטעון במיטען אלקטרוסטטי יימצא בפוטנציאל א"ס אופייני של 15,000 וולט. בתנאי יובש, לדוגמה: ב-20% לחות יחסית, אדם עשוי להיטען במיטען א"ס עד 25,000-30,000 וולט.

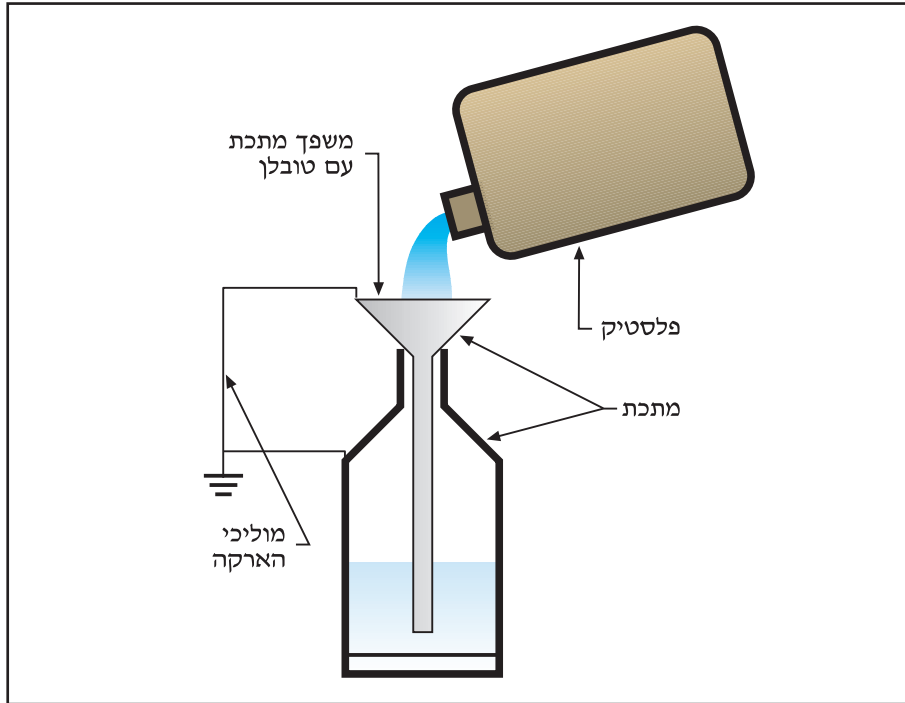
טעינה אלקטרוסטטית גוברת באופן טבעי בעיקר בחודשים המתאפיינים באוויר יבש, בסתיו ובאביב. בעיית הפריקה האלקטרוסטטית איננה נעלמת לחלוטין בחורף ובקיץ. בחורף יש יובש מוגבר באולמות סגורים, המחוממים בהסקה מרכזית. בקיץ - מזגני אוויר מרכזיים מקררים ומייבשים את האוויר. כל מי שמשתמש במכונית וסובל מחבטות פריקה אלקטרוסטטית בעת היציאה מכלי הרכב, יכול לחוש בהבדל ברמות הטעינה בין עונות השנה.

### מניעת טעינה אלקטרוסטטית

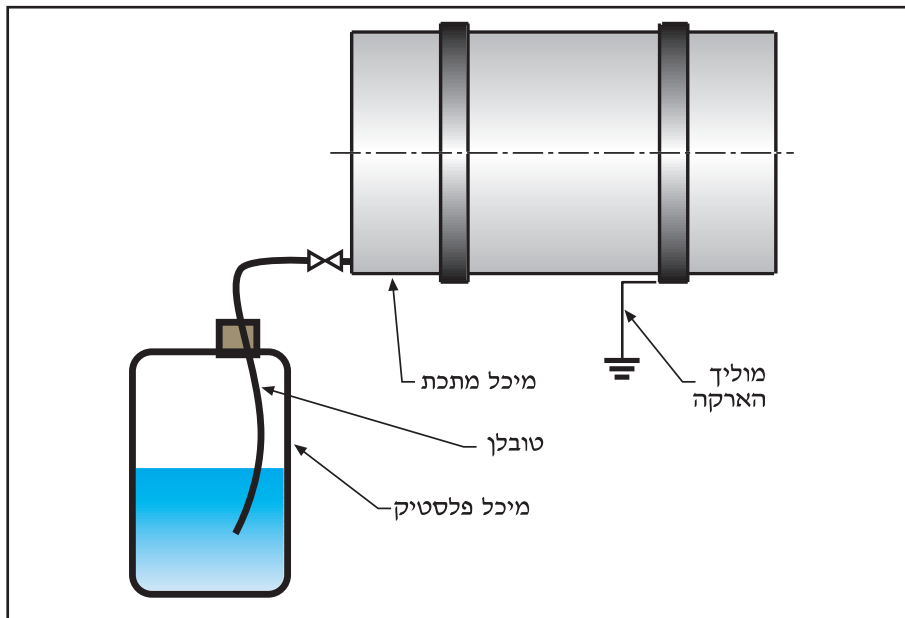
מניעת טעינה אלקטרוסטטית נעשית בעיקר על-ידי הארקה של גופים מוליכים למסה של כדור הארץ. שיטות נוספות מונעות טעינה של מבודדים, בדרך של פיזור מיטעני חשמל סטטי באמצעות הגברת לחות האוויר; יצירת סביבה מוליכה - מפזרת מיטענים; או ניטרול מיטענים אלקטרוסטטיים על-ידי מיינני אוויר (יוניזטורים).



איור 11: הארקה של רכיבי מתכת המורכבים על צינור לא מוליך



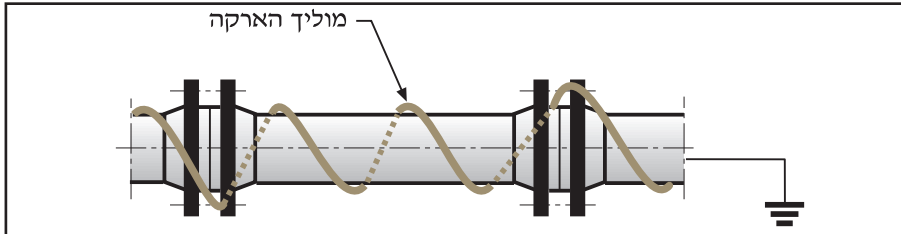
איור 12: העברת נוזלים ממיכל פלסטיק אל מיכל מתכת



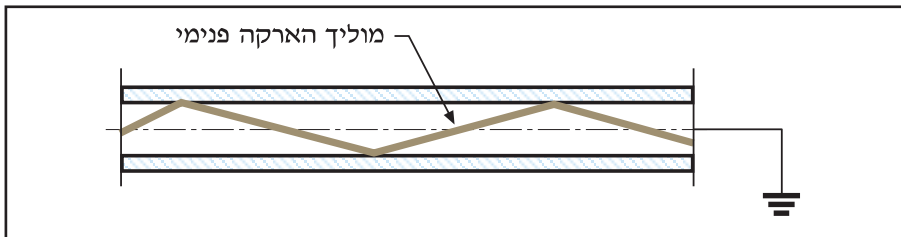
איור 13: העברת נוזלים ממיכל מוליך אל מיכל מפלסטיק

## פריקה אלקטרוסטטית

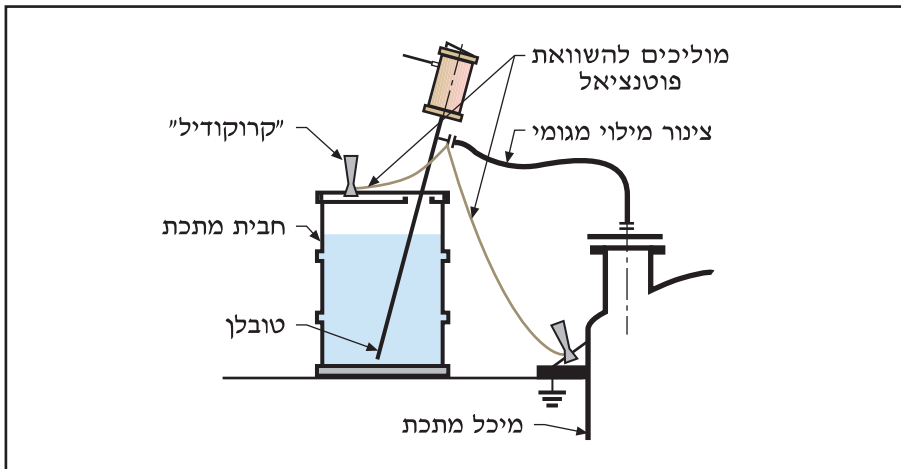
פריקה אלקטרוסטטית היא תהליך שבו השדה האלקטרוסטטי סביב גוף טעון גורם ליינון האוויר ולהתפרקות פורצת ("פריקת הבזק") בין שני גופים סמוכים. כאשר הפריקה עוברת דרך חומר פציץ או דליק - קיימת סכנה של התפוצצות או שריפה. ניתן למנוע פריקה אלקטרוסטטית בעיקר על-ידי גישור בין מוליכים, לשם יצירת מערך שווה פוטנציאל. "מערך" מתייחס לעמדת העבודה, העובד, החומרים, הכלים וכל הקשור בהם.



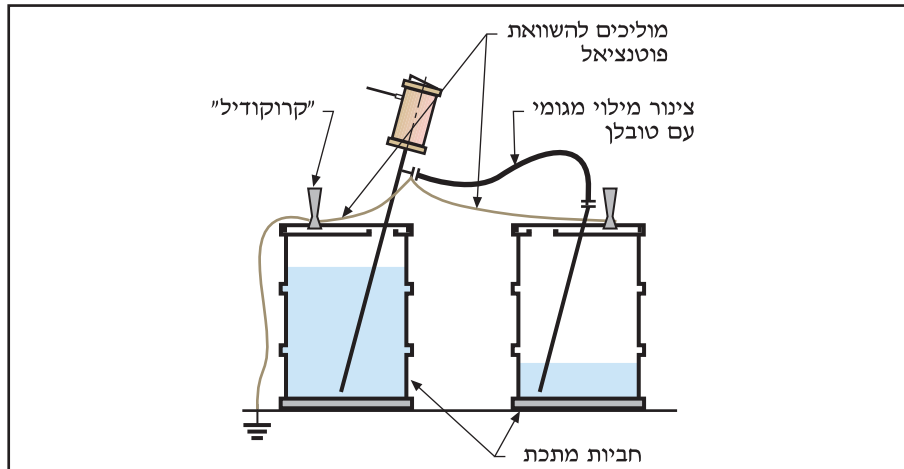
איור 14: אין אפשרות להאריק צינורות זכוכית או פלסטיק. לכן מלפפים מוליך הארקה בצורה רופפת סביב הצינור המבודד או מניחים את המוליך במקביל לו. כך משיגים חיבור בין אוגני המתכת והארקתם



איור 15: אין להעביר מוליך הארקה בין אוגנים בתוך הצינור - ניתוקו עלול לגרום לפריקה אלקטרוסטטית



איור 16: אין לחבר הארקה אל פתחי חבית מלאה בנוזל דליק ונדיף. זהו המקום שבו צפוי שיהיו אדים דליקים



איור 17: המוליכים להשוואת הפוטנציאל מחוברים אל המשאבה ואל החביות

האדם הוא "נשאן" מובהק למיטענים אלקטרוסטטיים. המוליכות החשמלית של הרקמות הביולוגיות מאפשרת למיטען האלקטרוסטטי הנאגר בגוף להשתחרר בבת אחת, באנרגיה המסוגלת לגרום להצתת אש או להפעלת חומר נפיץ. אחת משיטות הבקרה המרכזיות מתייחסת לאדם עצמו. השיטה כוללת "קשירה מוליכה" של העובד לתחנת העבודה לשם יצירת מערך שווה פוטנציאל ומניעת טעינה אלקטרוסטטית. לשם כך משתמשים בצמיד יד מוליך. אמצעי אחר הוא הארקת הרגל, באמצעות רצועות עקב (לגוסטטים) או נעלי בטיחות אנטיסטטיות. הארקת עמדת העבודה נעשית על-ידי מגשר נחושת - מוליך המגשר את עמדת העבודה אל הארקת היסוד.

## מנגנון הכשל של פריקה אלקטרוסטטית

כננה את צירוף האירועים, הנסיבות והתנאים הגורמים להצתת חומרים מסוכנים על-ידי פריקה אלקטרוסטטית: "מנגנון הכשל של פא"ס". מנגנון הכשל יתקיים אם יתקיימו בו-זמנית 3 גורמים כמפורט להלן:

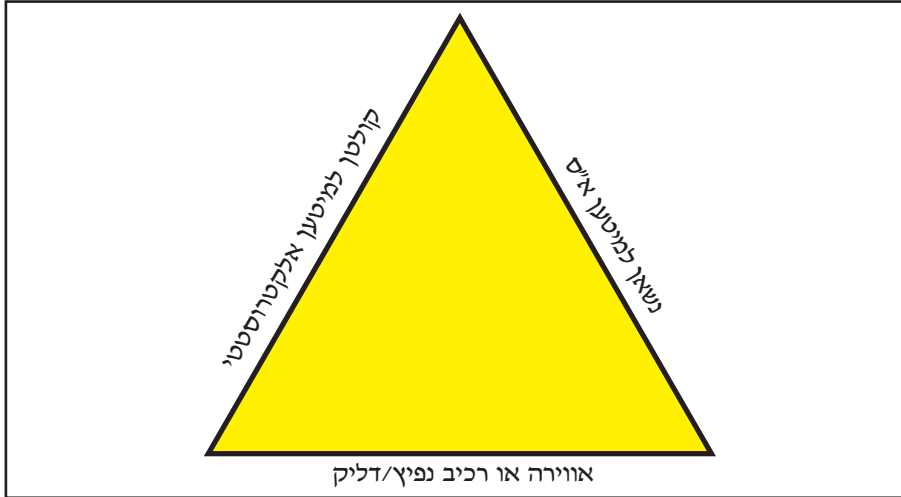
- "נשאן" (Carrier) של מיטען אלקטרוסטטי. גוף מוליך בעל קיבול חשמלי עצמי משמעותי (10 pF ויותר) או מבודד שאינו מוצק (נוזל, אבק, גרגרים, אירוסול, גז וכיו"ב).
- קולטן (Receptor) של מיטען אלקטרוסטטי. גוף מוליך מוארק, או בעל קיבול עצמי משמעותי (גם אם אינו מוארק). כל גוף מתכתי מוארק עשוי לשמש קולטן.
- רכיב רגיש או תווך דליק או נפיץ, אשר דרכו מתפרק המיטען האלקטרוסטטי מהנשאן אל תוך הקולטן.

איור 18 מציג את המשולש, שכל אחת מצלעותיו חיונית לקיומו של מנגנון הכשל. בקרת הפריקה האלקטרוסטטית אפשרית על-ידי:

- סילוקו של נשאן המיטען. לדוגמה, הארקת "נשאן" הופכת אותו ל"קולטן";
- סילוק התווך הדליק/פציץ.
- דילול החומר באווירה נפיצה אל מתחת לריכוז הנפיץ/הדליק (Explosion Limit) של התערובת;
- החדרת תוספים מוליכים לנוזלים מבודדים;
- סינון חלקיקי אבק ואדי מים מגזים דליקים, וכיו"ב.

התקן הישראלי - מת"י 1069 ותקן NFPA 77 (ראו פרק שמיני - תקנים ומידע), מפרטים דרכי פיקוח על פריקה אלקטרוסטטית בתעשיות שונות.





איור 18: משולש הכשל האלקטרוסטטי

## ניתוח אירוע הצתה עקב פריקה אלקטרוסטטית

ננתח את התאונה המתוארת כאן באמצעות משולש הכשל. במפעל כימי פרצה דליקה באזור משפך ההזנה לריאקטור (בכניסה למיתקן הייצור). השריפה אירעה בעת הזנת אוריאה (אבקה/גרגרים של חומר אורגני) אל נפה דרך משפך מתכת. רשת הנפה המתכתית היתה אביזר "צף" חשמלי (בלתי מוארק). מתוך הריאקטור עלו אדי טולואן. תוך כדי הזנת החומר, פרצה דליקה ושריפת טפולן במוצא הנפה עלה באש.

### משולש הכשל

- נשאן של מיטען אלקטרוסטטי: הרשת המתכתית של הנפה, המהווה אביזר "צף", היא נשאן פוטנציאלי.
- קולטן של מיטען אלקטרוסטטי: המשכו של המשפך באזור דפנות הנפה הוא מעבר מתכתי מוארק. כל גוף מוארק מהווה "קולטן".
- תווד דליק או נפיץ: אדי טולואן ואוויר בריכוז של 1.3%-7%.

### אירוע הכשל

הרשת המתכתית של הנפה, בהיותה אביזר "צף", נטענת במיטען סטטי במעבר האוריאה דרכה. המיטען נצבר בהתמדה ומעלה את הפוטנציאל האלקטרוסטטי של הרשת ביחס לסביבה המתכתית המוארקת. תהליך הטעינה האלקטרוסטטי מסתיים במעבר ניצוץ מהרשת אל הדופן המוליכה דרך אדי הטולואן.

### מניעת אירוע הכשל

אפשר היה למנוע את הכשל על-ידי:

- (א) הארקת רשת הנפה.
  - (ב) הכנסת חנקן לתוך המערכת - כדי להפוך את אווירת אדי הטולואן לאווירה בלתי דליקה ("איידוש", To inert - הפיכת המיתקן ל"אדיש").
- היות וזוהי "מערכת פתוחה", האיידוש בחנקן אינו יכול להיות יעיל. לעומת זאת, הארקת רשת הנפה היא פתרון זול, פשוט ואמין, ההופך את "נשאן המיטען" ממשולש הכשל ל"קולטן".