

ניהול סיכוני חשמל סטטי בתעשייה

חלק א': נוזלים וגזים דליקים

כותבים: שי שגב ואולגה גולני

מרץ 2026



מדריך זה הוצא לאור על ידי איגוד הכימיה, פרמצבטיקה ואיכות הסביבה בהתאחדות התעשיינים בישראל

המדריך נועד לשמש כלי מקצועי מסייע לניהול סיכוני חשמל סטטי בתעשייה, להנגיש ידע מקצועי לכדי כלי עבודה מעשיים, במטרה להבטיח את הבטיחות והחוסן התפעולי של התעשייה הישראלית ואינו מהווה חקיקה, תקנה, צו או הוראה מחייבת מכוח דין.

האמור במדריך אינו מחליף את הוראות כל דין, תקן רשמי, רישיון, היתר או דרישה רגולטורית אחרת החלים על מקום העבודה או על תהליך מסוים, ואין בו כדי לגרוע מהחובות המוטלות על מחזיק במקום העבודה, על המעסיק או על כל נושא משרה לפי כל דין.

היישום של העקרונות, הדוגמאות וההמלצות המפורטים במדריך מחייב התאמה לנסיבות הספציפיות של כל מתקן, תהליך וסביבת עבודה, וביצוע ניתוח סיכונים פרטני בהתאם לדרישות הדין ולמדיניות הבטיחות של מקום העבודה.

פתח דבר: שמירה על חיי אדם בלב התהליך התעשייתי

הבטחת שלומם ובריאותם של העובדים בתעשייה היא שליחות ציבורית מהמעלה הראשונה. האחריות למניעת תאונות עבודה, ובפרט אירועי פיצוץ ושריפה באטמוספרות נפיצות, מחייבת שילוב של רגולציה ברורה, ידע מקצועי מעמיק ויישום מוקפד בשטח.

חשמל סטטי הוא אחד מגורמי הסיכון המתעתעים ביותר בתעשייה התהליכית. מדובר בתופעה פיזיקלית טבעית, יומיומית לכאורה, אך כאשר היא פוגשת נוזלים או גזים דליקים בתנאים מתאימים, היא עלולה להפוך לגורם הצתה קטלני. הניסיון בארץ ובעולם מלמד כי אירועים רבים התרחשו לא בשל כשל טכנולוגי חריג, אלא במהלך פעולות שגרתיות שבוצעו ללא ניתוח סיכונים מספק וללא בקורות מתאימות.

המדריך שלפניכם מהווה נדבך משמעותי בחיזוק תרבות הבטיחות בתעשייה הישראלית. ייחודו בכך שהוא פרי עבודה משותפת של גורמי מקצוע מהתעשייה ומהרגולטור, הנשענת על תקנים מחייבים, ספרות מקצועית ותחקירי אירועים תעשייתיים.

חיבור זה בין הידע ההנדסי היישומי לבין דרישות הדין יוצר מסמך אחוד וברור, המאפשר שפה מקצועית משותפת לכלל העוסקים בתחום.

תקנות הבטיחות בעבודה ותקנות תכנית לניהול הבטיחות מחייבות זיהוי שיטתי של גורמי סיכון, הערכתם ויישום בקורות להפחתתם לרמה קבילה. מדריך זה מספק כלים מעשיים ליישום חובה זו בכל הנוגע לסיכונים חשמל סטטי, ומדגיש את החשיבות שבניהול סיכונים דינמי ומתמשך, החל משלב התכנון ההנדסי, דרך התפעול השוטף ועד להכשרת עובדים ובקרת אפקטיביות.

מינהל הבטיחות רואה בשיתופי פעולה דוגמת זה שהוביל למדריך שלפניכם, ביטוי לגישה מתקדמת לניהול מדיניות לאומית של בטיחות ובריאות תעסוקתית: רגולציה שאינה מסתפקת באכיפה, אלא פועלת להנגשת ידע, ליצירת סטנדרט מקצועי אחיד ולהובלת שינוי תרבותי עמוק. כאשר התעשייה והרגולטור פועלים יחד, ניתן לצמצם פערים ולחזק את האחריות המשותפת לחיי אדם.

אני קורא למנהלי מפעלים, למהנדסים, לממוני בטיחות ולכלל בעלי התפקידים הרלוונטיים לעיין לעומק במדריך וללמוד את המלצותיו. בטיחות איננה מסמך על המדף אלא מחויבות יומיומית הדורשת משמעת מקצועית ותרבות ארגונית חזקה.

זה המקום להודות לכל העוסקים לייזומו של מדריך זה וכתבתו, ובכלל זה לאולגה גולני, מנהלת תחום בטיחות תהליכית במינהל, ששקדה רבות על כתיבתו במטרה להביאו לפרסום.

יחד נמשיך לפעול לחיזוק חוסנה של התעשייה הישראלית כך שלצד קידומה כתעשייה מתקדמת ותחרותית, היא תהא גם בטוחה למועסקים בה.

בברכה,

אינג' חזי שוורצמן,

ראש מינהל הבטיחות והבריאות התעסוקתית

ומפקח עבודה ראשי

פתח דבר : בטיחות כערך אסטרטגי

בהתאחדות התעשיינים, אנו רואים בבטיחות אבן יסוד לחוסנה ולהמשכיותה של התעשייה הישראלית. ניהול סיכונים מושכל הוא הדרך המרכזית להבטחת יציבות תפעולית ושמירה על הנכס היקר לנו מכל: שלומם של העובדים.

מדריך זה מתמקד בסיכון החשמל הסטטי - גורם סיכון שקט ובלתי נראה השכיח בתעשייה התהליכית. בשל אופיו החמקמק, הוא דורש ערנות גבוהה והבנה מעמיקה, שכן הוא נוכח דווקא בפעולות השגרתיות ביותר. האתגר הניהולי טמון במניעת שאננות מול סיכון שאינו גלוי לעין, אך עלול להוביל לאירועים קריטיים במפגש עם אווירה דליקה.

המדריך משמש כגשר מקצועי המתרגם תקינה בינלאומית לשפה מעשית. הוא מנגיש פתרונות הנדסיים, החל מהארקה קפדנית ועד לניהול מהירויות שינוע, כדי להבטיח שכל תהליך ייצור יתבצע בביטחון מלא. אימוץ תרבות בטיחות המבוססת על ידע וסטנדרטים מתמירים הוא הדרך היחידה להשגת "סיכון קביל" ושקט תפעולי לאורך זמן.

אני קורא לכם להפוך מדריך זה למצפן מקצועי בתוכניות העבודה המפעליות. רק מחויבות בלתי מתפשרת לבטיחות תבטיח שהתעשייה הישראלית תמשיך לצמוח ולהוביל בבטחה

בהזדמנות זו, נבקש להודות לשי שגב ולאולגה גולני על כתיבתו של מדריך חשוב זה. עבודתם המאומצת והידע המקצועי המעמיק שהפגינו לאורך תהליך הכתיבה ניכרים בכל פרק, והם שהופכים את המסמך לנכס משמעותי עבור התעשייה. התגייסותם להנגשת המידע ולריכוז ההנחיות המקצועיות ראויה להערכה רבה, שכן המדריך מעניק מענה חיוני לאתגרים בטיחותיים ותפעוליים מורכבים.

כחלק מהמחויבות איגוד הכימיה, פרמצבטיקה ואיכות הסביבה להעמקת הידע והטמעת סטנדרטים מתקדמים, הקמנו במסגרת האיגוד את ועדת הבטיחות בתעשייה הכימית התהליכית. הוועדה מהווה פלטפורמה מקצועית לשיתוף ידע, למידה מאירועים וקידום פתרונות הנדסיים ותפעוליים לטובת כלל הענף.

אני מזמין אתכם, מנהלים ואנשי מקצוע, לקחת חלק פעיל בעבודת הוועדה ולתרום מניסיונכם לביצור חוסנה של התעשייה שלנו.

בברכה,

ניר קנטור

מנהל איגוד הכימיה, פרמצבטיקה ואיכות הסביבה
התאחדות התעשיינים בישראל

תוכן עניינים:

מס"ד	שם הפרק	עמוד
1	הגדרות ומונחים בהם נעשה שימוש בספר זה	6
2	מבוא	8
3	שלבים בניהול סיכונים	9
4	שלבים להיווצרות הצתה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי	11
5	מנגנוני פריקת חשמל סטטי	16
5.1	פריקת ניצוץ (Spark Discharge)	16
5.2	פריקת מברשת (Brush Discharge)	20
5.3	פריקת מברשת מתגלגלת (Propagating Brush Discharge)	23
6	תרחישי פריקת חשמל סטטי במהלך פעילויות נפוצות	24
6.1	מילוי בהתזה (Splash Filling)	24
6.2	החלפת תכולה (Switch Loading)	26
6.3	פריקת חשמל סטטי במהלך שימוש בביוביות (מכלית ואקום) לצורך שאיבת נוזלים דליקים	27
6.4	פריקת חשמל סטטי במהלך מילוי או ריקון מכלי קוביה	28
6.5	פריקת חשמל סטטי במהלך ניקוי מכלים המכילים אוירה נפיצה עם נוזל בלחץ	30
6.6	פריקת חשמל סטטי כתוצאה משימוש בצנרת גמישה עם סליל מתכתי פנימי	30
7	בקורות מקובלות להקטנת ההסתברות לפריקת חשמל סטטי	31
7.1	אווירה אינרטית	31
7.2	שינוי בתהליך	31
8	מידע נדרש לצורך ניתוח התרחישים	34
8.1	השפעת הלחות	35
9	מנגנוני פריקת חשמל סטטי בגזים	35
9.1	הצתה כתוצאה מנוכחות טיפות נוזל או מוצקים בזרם הגז	35
9.2	הצתה כתוצאה מחיכוך של מוצק/קרח עם גז דליק	36
9.3	פריקת קורונה (Corona Discharge)	36
10	נספחים	38
10.1	נספח א'-מנגנוני הפריקה	38
10.2	נספח ב' - שלבים לביצוע סקר חשמל סטטי	40
10.3	נספח ג' – תקנים רלוונטיים	41
11	ביבילוגרפיה	41

רשימת תמונות ואיורים:

מס"ד	שם האיור	עמוד
1	השלבים הנדרשים להיווצרות חשמל סטטי	11
2	דוגמא להיווצרות מטען חשמל סטטי ע"י השראה	12
3	דוגמא לאלמנטים מתכתיים שאינם מוארקים / מגושרים ("מתכת צפה")	17
4	סקיצה של אופן מילוי האתיל אצטט במיכל המתכתי שגרם לתאונה	18
5	השריפה שנגרמה בעקבות פיצוץ מיכל האתיל אצטט	18
6	סקיצה של היווצרות פריקת מברשת	21
7	סקיצה של מיכל הנפטא שהיה מעורב באירוע	22
8,9	סקיצות של המיכל בו התרחש הפיצוץ בשל switch loading	26
10,11	המיכל לאחר הפיצוץ	27
12	דוגמא להפניית האדים מביובית למקום בטוח באמצעות צנרת גמישה	28
13	היררכיית הבקורות	31
14	טבעת (NASA Toroidal ring) הממזערת את ההסתברות לפריקת קורונה	37

ניתוח סיכוני חשמל סטטי לנוזלים וגזים

1. הגדרות ומונחים בהם נעשה שימוש בספר זה:

- 1.1. **אווירה נפיצה**: כהגדרתה בת"י 60079-0: תערובת של אוויר וחומרים דליקים או חומרים בעירים הנמצאים בטמפרטורה מעל נקודת ההבזקה של החומר העלולה לגרום לפיצוץ במקרה ותוצת.
- 1.2. **אנרגיית הצתה מינימאלית (MIE)**: כהגדרתה בת"י 60079-32.1: אנרגיה מינימלית היכולה להצית תערובת של חומר דליק מסוים עם אוויר או חמצן, הנמדדת בהתאם לתקן ASTM E582-88
- 1.3. **בקרת סיכון (Risk Control)** - כהגדרתה בתקנות ארגון הפיקוח על העבודה (תכנית לניהול הבטיחות), תשע"ג-2013: "בחירה והפעלה של אמצעים לביטול סיכונים או להפחתתם"
- 1.4. **גישור (bonding)**: כהגדרתו ב-NFPA 77: חיבור בין שני גופים מוליכים או יותר, בעזרת מוליך חשמלי, על מנת שגופים אלו יהיו בעלי אותו פוטנציאל חשמלי, אך לא בהכרח בפוטנציאל הזהה לזה של האדמה.
- 1.5. **דעיכת מטען (relaxation)**: התהליך שבו המטען החשמלי שהצטבר על גוף מסוים מתפרק בהדרגה.
- 1.6. **הארקה (Grounding)**: כהגדרתה ב-NFPA 77: חיבור לאדמה או לגוף מוליך המחובר לאדמה
- 1.7. **טעינה בהשראה חשמלית (Induction charging)**: טעינת גוף באופן לא ישיר, כתוצאה מהימצאותו של גוף טעון אחר בקרבתו.
- 1.8. **לחץ אדים**: כהגדרתו ב-API 2003: הלחץ שמפעילים האדים של חומר בכלי סגור בטמפי של 37.8°C
 - 1.8.1. **נוזל בעל לחץ אדים גבוה**: נוזל בעל לחץ אדים של מעל 4.5 psia בטמפי של 37.8°C (לדוגמא: בנזין).
 - 1.8.2. **נוזל בעל לחץ אדים בינוני**: נוזל בעל לחץ אדים של פחות מ- 4.5 psia (בטמפי של 37.8°C), ונקודת הבזקה של פחות מ- 38°C . (לדוגמא: טולואן, קסילן ובנזן).
 - 1.8.3. **נוזל בעל לחץ אדים נמוך**: נוזל בעל נקודת הבזקה הגבוהה מ- 38°C (לדוגמא: סולר, קרוסין).
- 1.9. **מוליכות חשמלית**: היכולת של חומר להעביר מטעני חשמל סטטי, נמדדת ביחידות פיקוסימנס למטר (pS/m). סיווג המוליכות תתבצע בהתאם לת"י 60079-32.1, סעיף 7.1.4: "charge accumulation and conductivity classification"
- 1.10. **נוזל בעל מוליכות חשמלית גבוהה (נוזל מוליך)**: נוזל בעל מוליכות חשמלית הגבוהה מ-50 Ps/m (בהתאם לתקן API2003)
- 1.11. **נוזל בעל מוליכות חשמלית נמוכה (נוזל מבודד)**: נוזל בעל מוליכות חשמלית הנמוכה מ-50 Ps/m (בהתאם לתקן API2003)

- 1.12. **נק' הבזקה (flash point):** הטמפי' המינימלית של נוזל בה נוצרים מספיק אדים ליצירת אווירה נפיצה בסמוך למפלס הנוזל או בתוך כלי האחסון בו נעשה שימוש.
- 1.13. **קבוע זמן התפרקות (relaxation time constant):** הזמן הדרוש בכדי לפרוק כ- 37% ממטען החשמל הסטטי (בהתאם לתקן API2003)
- 1.14. **נוזל בעיר (combustible liquid):** כהגדרתו ב-NFPA 30 - נוזל בעל נקודת הבזקה הגבוהה מ-OC37.8
- 1.15. **נוזל דליק (Flammable liquid):** כהגדרתו ב-NFPA 30 - נוזל בעל נקודת הבזקה הנמוכה מ-OC37.8
- 1.16. **"סיכון" (Safety Risk):** כהגדרתו בתקנות ארגון הפיקוח על העבודה (תכנית לניהול הבטיחות), תשע"ג-2013: "שילוב של ההסתברות להתרחשות מאורע מסוכן או לחשיפה לגורם או לגורמי סיכון, ושל חומרת הפגיעה הגופנית או של הבריאות הלקויה שעלול המאורע או החשיפה לגרום;"
- 1.17. **"סיכון קביל" (Acceptable Risk):** כהגדרתו בתקנות ארגון הפיקוח על העבודה (תכנית לניהול הבטיחות), תשע"ג-2013: "סיכון שהוקטן עד לרמה שהוגדרה כקבילה בידי המחזיק במקום העבודה, בהתחשב בחובותיו לפי דין ובמדיניות הבטיחות של מקום העבודה".
- 1.18. **רציפות הארקה (Grounding continuity):** רציפות נתיב חשמלי מוליך, שהתנגדותו $\Omega 10$ או פחות, בין הציוד לבין מערכת הארקה והקרע.
- 1.19. **קיצורים:**
- 1.19.1 American Petroleum Institute :API
- 1.19.2 National Fire Protection Association :NFPA

2. מבוא:

2.1. הקדמה

חשמל סטטי הוא תופעה שכיחה בתעשייה, העלולה להוות גורם סיכון משמעותי בתהליכים או פעולות בהן קיימת או עלולה להיווצר אווירה נפיצה. מדובר בתופעה פיזיקלית העלולה לגרום לתאונות חמורות לרבות פיצוץ ושריפה. ניתוח סיכוני החשמל סטטי הוא חלק חשוב בניהול הסיכונים בתעשייה. בכדי שהסיכון מפריקת חשמל סטטי יהיה קביל, ניתוחי הסיכונים המתבצעים במפעל צריכים לזהות את כל תרחישי פריקת החשמל הסטטי האפשריים, לנתח אותם ולוודא קיום בקורות מתאימות. מטרת מדריך זה לספק את הידע הנחוץ לניהול סיכוני חשמל סטטי בתעשייה. מדריך זה מבוסס על תקנים וספרות מקצועית לרבות תובנות רבות שנלמדו ממחקרים, ומתחקירי אירועים שהתרחשו במפעלי תעשייה בארץ ובעולם. המדריך מורכב משני חלקים: חלק א – ניהול סיכוני חשמל סטטי בעבודה עם נוזלים וגזים דליקים (המסמך הנוכחי) חלק ב – ניהול סיכוני חשמל סטטי בעבודה עם אבקות (בהכנה).

2.2. דרישות רגולטוריות:

2.2.1. תקנות הבטיחות בעבודה (חשמל), התש"ן – 1990. סעיף 10:

"מתקן חשמלי הפועל באטמוספירה נפיצה חייב להיות מהסוג המונע התפוצצות; המתקן יהיה מותאם לתקן ישראלי ת"י 786".
התקן הישראלי מספר 786 הוחלף בשנת 2010 על ידי ת"י 60079 - אטמוספרות נפוצות: על כל חלקיו¹.

2.2.2. תקנות ארגון הפיקוח על העבודה (תכנית לניהול הבטיחות), תשע"ג-2013:

תקנות אלו מחייבות בין היתר ביצוע ניתוח סיכונים עבור כל גורם סיכון

2.3. התקנים על בסיסם בנוי המדריך:

2.3.1. תקן ישראלי ת"י 60079 חלק 32.1: "אטמוספירות נפוצות: סיכוני חשמל סטטי – מדריך", 20181

2.3.2. תקנים בינלאומיים:

- i. NFPA 30: "Flammable and Combustible Liquids Code", 2024 Edition
- ii. NFPA 77: "Recommended Practice on Static Electricity", 2024 Edition
- iii. API 2003: "Protection Against Ignitions Arising Out of Static, Lightning, and Stray Currents", API Recommended Practice 2003, 8th Edition, 2015

¹ תקן ישראלי זה הוא למעשה (למעט 4 דפים בעברית), התקן של הנציבות הבין-לאומית לאלקטרוניקה IEC 60079, בגרסתו האנגלית.

2.4. הערה לשימוש במדריך:

מטרת מדריך זה הינה לפרט מנגנוני פריקת חשמל סטטי, תרחישים להצתה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי באטמוספרות נפיצות ואת הבקורות המרכזיות למזעור סיכוני התרחישים האלו. המדריך אינו נועד להחליף את התקנים הרלבנטיים העוסקים בנושא חשמל סטטי.

3. שלבים בניהול סיכונים:

השלבים בניהול סיכוני חשמל סטטי הינם זהים לשלבים הנדרשים בחקיקה ובתקנים ישראלים העוסקים בניהול סיכונים.

ניהול סיכונים מצריך ביצוע של כל השלבים הבאים:

שלב א' - זיהוי כל התרחישים האפשריים

מסמך זה מיועד לסייע למשתמש לזהות תרחישים אפשריים לפריקת חשמל סטטי באווירה נפיצה.

שלב ב' - הערכת הסיכון של כל אחד מהתרחישים:

הערכת הסיכונים של התרחישים חייבת להתבסס על בקורות הסיכונים הקיימות.

הערכת הסיכונים צריכה להתבצע בעזרת שימוש במטריצת סיכון שהוכנה ונקבעה מראש ע"י הנהלת המפעל. קיימות שתי סוגי מטריצות, איכותנית וכמותית.

דוגמה למטריצה האיכותנית:

הערכת הסיכון לכל תרחיש שזוהה בתהליך לעיל, צריכה להתבצע ע"י הגדרת חומרת התרחיש והסבירות להתממשותו. החומרה והסבירות נקבעים סובייקטיבית בהתאם לידיע ולניסיון של המשתתפים **בהערכת הסיכון**. את חומרת התרחיש יש להגדיר באופן שמרני (התרחיש המעשי הגרוע ביותר).

להלן דוגמא לטבלה המשמשת להערכת חומרת התרחיש:

עוצמת החומרה	חומרת אירוע בטיחות / פגיעה גופנית	חומרת הנזק הכלכלי
1 זניחה	פגיעה ללא היעדרות	נזק זניח
2 נמוכה	פגיעה עם היעדרות	נזק \$10,000~
3 בינוני	נכות (פגיעה בלתי הפיכה)	נזק \$100,000~
7 גבוהה	מוות	נזק \$1,000,000~
11 גבוהה מאד	אירוע רב נפגעים	נזק \$10,000,000~

להלן דוגמא לטבלה המשמשת להערכת הסבירות להתממשות התרחיש :

הגדרת הסבירות	תיאור
1 זניחה	אירוע שלא סביר שיקרה
2 נמוכה	אירוע בעל סבירות נמוכה שיקרה
3 בינונית	אירוע שסביר שיקרה
4 גבוהה	אירוע שכיח – אירוע שבוודאות יקרה.

רמת הסיכון מתקבלת על בסיס הכפלת הסבירות וחומרת הסיכון.

להלן דוגמא למטריצת רמת סיכון איכותנית :

		חומרה						
		11	7	3	2	1		
		חומרה גבוהה מאוד	חומרה גבוהה	חומרה בינונית	חומרה נמוכה	חומרה זניחה		
סבירות	1	11	7	3	2	1	זניחה	1
	2	22	14	6	4	2	נמוכה	2
	3	33	21	9	6	3	בינונית	3
	4	44	28	12	8	4	גבוהה	4

שלב ג' - הערכת קבילות הסיכון :

הערכת קבילות הסיכון תתבצע תוך השוואת הסיכון שהתקבל עבור כל אחד מהתרחישים אל מול סף הסיכון הקביל שהוגדר, וקביעה עבור כל תרחיש האם הסיכון הוא קביל או לא.

עבור כל תרחיש בו הסיכון שהתקבל אינו קביל, יש לשנות את התהליך או להוסיף שכבות בקרה בכדי למנוע את האפשרות להתממשות התרחיש או להקטין את חומרתו הצפויה.

שלב ד' – הטמעת הבקורות :

יישום הבקורות שנקבעו בנייתוח הסיכונים לצורך הורדת הסיכון לרמה קבילה

שלב ה' – שמירה על אפקטיביות הבקורות :

שמירה על אפקטיביות הבקורות במהלך התפעול השוטף, בכדי שיתנו את רמת ההגנה המתוכננת .

4. שלבים להיווצרות הצתה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי:

פריקות חשמל סטטי בתעשייה הינן גורם סיכון נפוץ להצתה. בניגוד לגורמי הצתה אחרים, פריקות חשמל סטטי עלולות להתרחש גם במהלך פעולות שגרתיות ולא רק כתוצאה מתקלה.

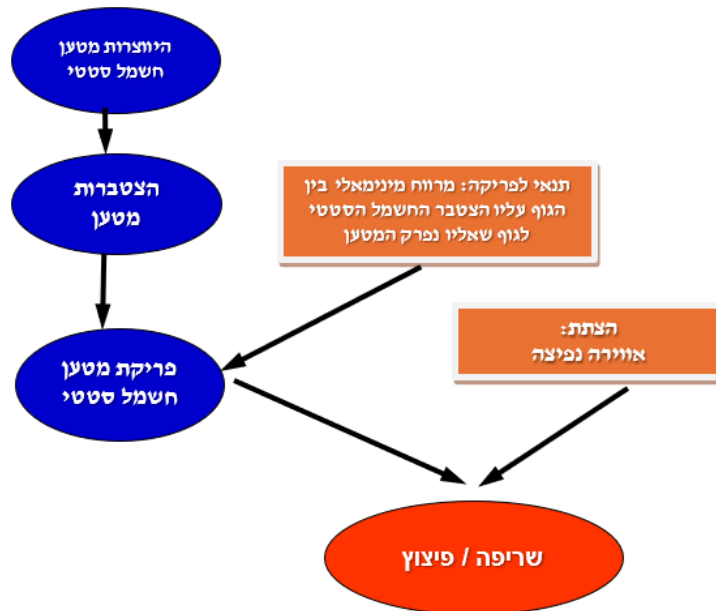
תהליך הצתה בשל פריקת חשמל סטטי מורכב מהשלבים הבאים:

שלב א' - היווצרות מטען חשמל סטטי

שלב ב' – הצטברות מטען החשמל הסטטי

שלב ג' - פריקת מטען החשמל הסטטי והיווצרות ניצוץ.

שלב ד' – הצתת האווירה נפיצה (גז דליק, אדים דליקים)



איור מס' 2; השלבים הנדרשים להיווצרות חשמל סטטי

4.1. שלב א' - היווצרות מטען חשמל סטטי:

מטען של חשמל סטטי נוצר כתוצאה מחיכוך בין שני גופים העשויים מחומרים שונים. כתוצאה מהחיכוך מתרחש מעבר אלקטרונים בין פני השטח של שני הגופים, כאשר לאחר מכן, הגוף בו קיים עודף אלקטרונים יהיה בעל מטען שלילי (-) והגוף בו חסרים אלקטרונים יהיה בעל מטען חיובי (+)². מטען של חשמל סטטי יכול גם להיווצר כתוצאה מהשראה חשמלית שיוצר גוף אחר, שטעון במטען חשמל סטטי. לדוגמא, אוגן מתכתי שאינו מוארק או

² המתח החשמלי בין שני גופים אלו יכול להגיע לאלפי וולט ויותר.

מגושר ונמצא על צנרת זכוכית בה מתרחשת זרימת נוזל. האוגן יכול לצבור כמות גבוהה של מטענים למרות שאינו נמצא במגע ישיר עם הנוזל.



תמונה מס' 3; דוגמא להיווצרות מטען חשמל סטטי ע"י השראה

פרמטר חשוב בשלב זה הינו קצב היווצרות המטען החשמלי. קצב היווצרות זה מושפע מהגורמים הבאים:

א. עוצמת החיכוך הנוצרת במגע בין שני גופים:

- ככל שמהירות הזרימה של נוזלים בצינור תהיה גבוהה יותר, החיכוך בין הנוזל לדפנות הצנרת יהיה גבוה יותר, וכתוצאה מכך קצב היווצרות מטען החשמל הסטטי יהיה גבוה יותר.
- ככל שרשת המסנן דרכה זורם נוזל תהיה צפופה יותר, החיכוך בין המסנן לנוזל יהיה גבוה יותר ולכן קצב היווצרות מטען החשמל הסטטי יהיה גבוה יותר.
- העלאת מהירות מסוע העשוי מרצועות בלתי מוליכות תעלה את החיכוך בין הרצועות לגלילי המסוע וכתוצאה מכך תעלה את קצב יצירת מטען החשמל הסטטי על גבי הרצועות.

ב. חומרי המבנה של האלמנטים ביניהם נוצר החיכוך

ישנם חומרים בעלי נטייה גבוהה יותר מאחרים ליצירת מטען חשמל סטטי (נוטים יותר לאבד או לקלוט אלקטרונים). כך למשל, החיכוך של נוזל במהלך שינועו בצנרת עלול לגרום לטעינתו, חיכוך בין בדים העשויים מחומרים סינתטיים לבין מכונות או גוף האדם יגרום לטעינתם.³

³ בכדי לבדוק אם זוג חומרים יכולים ליצור ביניהם חשמל סטטי, ניתן להשתמש בסולם הטריבואלקטרי המופיע בנספח א': ככל שהמרחק בין החומרים בסולם הטריבואלקטרי הוא גדול יותר כך מעבר האלקטרונים ביניהם יהיה טוב יותר, כלומר ייווצר חשמל סטטי בקצב גבוה יותר.

4.2. שלב ב' – הצטברות מטען החשמל הסטטי :

מטען של חשמל סטטי מצטבר על גבי גוף, כאשר הקצב בו הוא נוצר גבוה מקצב דעיכת המטען. קצב דעיכת המטען ניתן להערכה בעזרת קבוע דעיכת המטען (Charge relaxation constant) . קבוע דעיכת המטען, מוגדר כזמן הדרוש בכדי לפרוק כ- 37%⁴ ממטען החשמל הסטטי⁵.

הגורמים המשפיעים על קצב דעיכת המטען הינם

מוליכות הזורם

ככל שהנוזל בעל מוליכות נמוכה יותר, המטען החשמלי דועך ממנו בקצב איטי יותר ולכן יצטבר עליו מטען חשמלי גבוה יותר. בטבלה מס' 1 מפורטות דוגמאות למוליכות וקבוע דעיכת המטען של נוזלים נפוצים בתעשייה.

מוליכות חומר המבנה ממנו עשוי הציוד התהליכי (כגון צנרת ומכלים)

כאשר חומר טעון נמצא בציוד העשוי מחומר מבודד (חומר בעל מוליכות נמוכה כגון פלסטיק או זכוכית), יצטבר עליו מטען של חשמל סטטי מכיוון שקצב הדעיכה יהיה נמוך יותר.

הארקה / גישור של ציוד תהליכי

קצב הפריקה מציוד תהליכי שאינו מוארק או מגושר הוא נמוך, גם אם הוא עשוי מחומר מתכתי/ מוליך. כלומר מטען חשמל סטטי יצטבר על ציודים מתכתיים שאינם מוארקים. במידה והציוד המתכתי מוארק, מטען החשמל הסטטי ידעך ממנו במהירות ולכן ההסתברות להצטברותו על גבי הציוד היא נמוכה.

⁴ $37\% = e^{-1}$

⁵ עבור מרבית הנוזלים הדליקים (נוזלים פחמימנים), קבוע זה מחושב לפי הנוסחה: $t = 18/s$ כאשר:

t - קבוע דעיכת המטען (זמן הדעיכה של 37% מהמטען) בשניות
s - מוליכות הנוזל [pS/m]

באופן מעשי, מרבית המטען נפרק מהנוזל אחרי 3t ונפרק לחלוטין לאחר 5t.

טבלה מס' 2; מוליכות וקבוע דעיכת המטען של נוזלים נפוצים

שם הנוזל	מוליכות חשמלית [pS/m]	קבוע דעיכת המטען [שניות] Charge relaxation constant
נוזלים מבודדים בעלי מוליכות נמוכה (פחות מ- 25 pS/m)		
בנזין	0.1-100	0.2 עד 200
קרוסין	0.1-50	0.4 עד 200
בנזן	$5 \cdot 10^{-3}$	100
ציקלוקסאן	<2	>8.8
שמני סיכה	0.01-100	0.02 עד 2000
סולר	0.1	100
הפטאן	$3 \cdot 10^{-2}$	100
הקסאן	$1 \cdot 10^{-5}$	100
דס"ל	0.01-50	0.39-100
טולואן	<1	21
נוזלים בעלי מוליכות בינונית (בין ל- 25 ל- 10,000 pS/m)		
כלורובנזן	7000	$7.1 \cdot 10^{-3}$
דיכלורובנזן	3000	$2.9 \cdot 10^{-3}$
אתילן דיכלוריד	4000	$2.2 \cdot 10^{-2}$
מתילן כלוריד	4300	$1.8 \cdot 10^{-2}$
טריכלורואתילן	800	$3.7 \cdot 10^{-2}$
נוזלים בעלי מוליכות גבוהה (מעל 10,000 pS/m)		
נפט גולמי	> 0.001	קטן מ- 0.02
אצטלדהיד	$1.7 \cdot 10^8$	$1.1 \cdot 10^{-6}$
חומצה אצטית	$1.12 \cdot 10^6$	$4.9 \cdot 10^{-5}$
אצטון	$6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{-5}$
אצטוניטריל	$7 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^{-7}$
מים מזוקקים	5	10^{-6}
מים (לא מזוקקים)	>100	$< 2 \cdot 10^{-7}$

4.3. שלב ג' – פריקת מטען החשמל הסטטי:

הצטברות מטען החשמל סטטי על גוף גורמת להעלאת הפוטנציאל החשמלי בו כך שהגוף הופך להיות "קבלי" של חשמל סטטי. כאשר הפוטנציאל שמצטבר על גבי הגוף גבוה דיו⁶, עלולה להתרחש פריקת חשמל סטטי.

פריקת חשמל סטטי יכולה להתרחש בשני תרחישים מרכזיים:

✚ פריקה בין הנוזל הטעון לגוף אחר, כגון: אדם, כלי דיגום, אביזר צנרת, ציוד מדידה וכד'.

✚ פריקה בין הצנרת / ציוד (שנטען במטען חשמל סטטי כתוצאה מזרימת הנוזל) לבין גוף אחר כגון: אדם, כלי דיגום, אביזר צנרת, ציוד מדידה וכד'.

בכדי שהפריקה תתרחש, חייב להיות מרווח (של מילימטרים בודדים) בין הגוף עליו הצטבר החשמל הסטטי לגוף שאליו נפרק המטען.

סוגי פריקות החשמל הסטטי מפורטים להלן בפרק "מנגנוני פריקות חשמל סטטי".

4.4. שלב ד' – הצתה אווירה נפיצה הגורמת לשריפה/ פיצוץ:

בכדי שתתרחש שריפה או פיצוץ מפריקת חשמל סטטי, צריכים להתקיים התנאים הבאים:

✚ המצאות אווירה נפיצה⁷ - בחלק זה של המדריך נדון בהיווצרות אווירה נפיצה בשל:

- שימוש בנוזלים דליקים או בעירים הנמצאים בטמפ' הגבוהה מנקודת ההבזקה (Flash Point) שלהם. במקרה בו הנוזלים יוצרים "ערפל" (mist), טיפות זעירות של נוזל דליק באוויר, ההצתה עלולה להתרחש גם בטמפ' הנמוכה מטמפ' ההבזקה של החומר.
- שימוש בגזים דליקים

האנרגיה המשתחררת כתוצאה מפריקת החשמל הסטטי גבוהה יותר מאנרגיית ההצתה המינימאלית (MIE-Minimum Ignition Energy) הנדרשת להצתת החומרים היוצרים את האווירה הנפיצה.

⁶ פוטנציאל גבוה דיו בכדי לפרוץ את הבידוד הנוצר ע"י האוויר: האוויר, כמו כל חומר מבודד, מסוגל לעמוד בפני שדה חשמלי עד גבול מסוים מעבר לגבול הזה מתרחש "פריצה דיאלקטרית", (dielectric breakdown) כלומר, האוויר כבר לא מבודד וזורם דרכו זרם

⁷ אווירה נפיצה תתקיים כאשר ריכוז נפחי של אדי החומר הדליק נמצא בתחום שבין סף הנפיצות התחתון (LEL -Lower Explosion Limit) לבין סף הנפיצות העליון (UEL -Upper Explosion Limit).

5. מנגנוני פריקת חשמל סטטי:

מבחינה פיסיקלית ישנם מספר סוגים של פריקות חשמל סטטי. בפרק זה נדון בתרחישי פריקות חשמל סטטי העלולות להצית אווירה נפיצה של אדי נוזלים וגזים דליקים. הסוגים השכיחים מפורטים להלן:

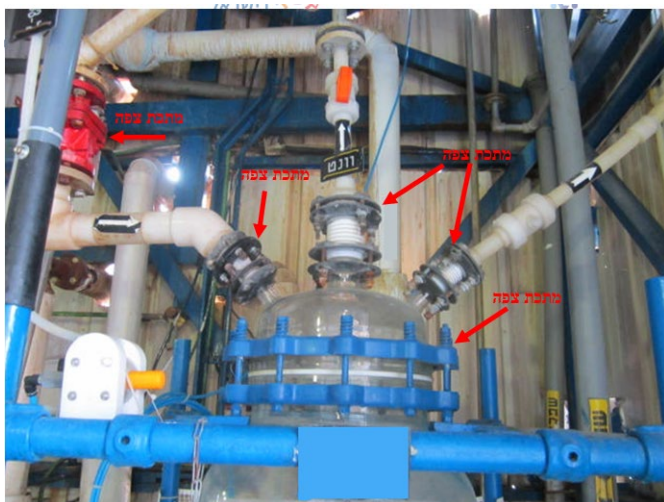
5.1. פריקת ניצוץ (Spark Discharge):

פריקת ניצוץ מתרחשת בין שני גופים מוליכים שקיים ביניהם הפרש פוטנציאליים. מצב זה מתרחש בד"כ כאשר לפחות אחד מהגופים אינו מוארק.

5.1.1. תרחישים לפריקת ניצוץ:

פיצוץ כתוצאה מפריקת ניצוץ בעקבות הצטברות מטען חשמל סטטי על גבי גוף מתכתי שאינו מוארק או מגושר ("מתכת צפה").

- **היווצרות המטען:** זרימה של נוזל (גם אם הנוזל מוליך וגם אם הוא מבודד) בתוך צנרת העשויה מחומר מבודד תגרום לטעינתו כתוצאה מהחיכוך שבין הנוזל לדופן הצנרת.
 - **הצטברות המטען:** גוף מתכתי שאינו מוארק או מגושר (כגון ברז או אוגן הנמצאים על קו צנרת פלסטיק), יכול לצבור כמות גבוהה של מטען חשמל סטטי ולהפוך למעין קבל בעל מתח גבוה. הגוף המתכתי לא חייב להיות במגע ישיר עם הנוזל מאחר ומטען של חשמל סטטי יכול לעבור גם בהשראה ולטעון גוף מתכתי הסמוך אליו.
 - **פריקת המטען:** במידה ויתקרב אל הגוף המתכתי הטעון במטען חשמל סטטי גוף מוליך אחר בעל פוטנציאל חשמלי שונה (לדוגמא אדם), עלולה להתרחש פריקת ניצוץ והצתת אוירה נפיצה (במידה וקיימת).
- בתמונה מס' 3 להלן ניתן לראות ציוד תהליכי העשוי מזכוכית אליו מחוברים קווי צנרת העשויים מפלסטיק, כאשר הברז והאוגנים הינם מתכתיים. מאחר והברז והאוגנים המתכתיים אינם מוארקים או מגושרים הם עלולים לשמש כמעין קבל של חשמל סטטי ("מתכת צפה"), וכתוצאה מכך תוכל להתרחש פריקת ניצוץ במהלך השוואת פוטנציאליים עם גוף אחר.



תמונה מס' 4; דוגמא לאלמנטים מתכתיים שאינם מוארקים / מגושרים ("מתכת צפה")

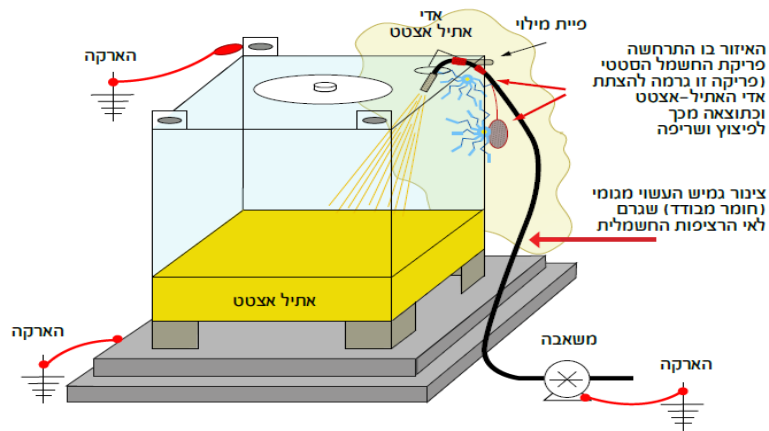
- פיצוץ כתוצאה מפריקת ניצוץ עקב זרימה של נוזל מוליך בתוך צנרת מבודדת:
- **היווצרות המטען:** זרימה של נוזל מוליך⁸ בתוך צנרת מבודדת תגרום לטעינתו כתוצאה מהחיכוך שבין הנוזל לדופן הצנרת.
 - **הצטברות המטען:** במידה והנוזל נכנס לתוך כלי קיבול העשוי מחומר מבודד (לדוגמא לתוך חבית פלסטיק או מיכל קובייה העשוי מפלסטיק) הנוזל יישאר טעון.
 - **פריקת המטען:** במידה ויתקרב אל הנוזל הטעון במטען חשמל סטטי גוף מוליך אחר בעל פוטנציאל חשמלי שונה (לדוגמא אדם) עלולה להתרחש פריקת ניצוץ והצתת אווירה נפיצה.

5.1.2. תאונה עקב פיצוץ שנגרם בשל פריקת ניצוץ:

מה קרה?

במפעל Barton Solvents שבארה"ב מילאו מיכל מתכתי בנפח של 1135 ליטר (300 גלון) באתיל אצטט (נוזל מוליך). המילוי נעשה בעזרת צינור גמיש העשוי מגומי (חומר מבודד) שבקצהו הותקנה פיית מילוי מתכתית (ראה הסקיצה בהמשך). למרות שהמיכל המתכתי חובר להארקה, למרות שהמשאבה חוברת להארקה ולמרות שהוא הוצב על גבי משטח מתכתי שגם הוא חובר להארקה, אירע פיצוץ של המיכל המלווה בשריפה.

⁸ במידה והנוזל הינו מבודד עלול להתרחש תרחיש דומה במנגנון של פריקת מברשת המתואר בהמשך.



איור מס' 5; סקיצה של אופן מילוי האחיל אצטט במיכל המתכתי שגם לתאונה



תמונה מס' 6; השריפה שנגרמה בעקבות פיצוץ מיכל האחיל אצטט

תרמישים אפשריים לפריקת החשמל הסטטי באירוע זה:

תרמיש א'⁹: פריקת ניצוץ כתוצאה מהפרש פוטנציאלים בין פיית המילוי למיכל

המתכתי:

- **היווצרות המטען:** החיכוך שנוצר בין האחיל אצטט (נוזל מוליך) לבין הצינור הגמיש העשוי מגומי (חומר מבודד), גרם לטעינת נוזל האחיל אצטט במטען של חשמל סטטי במהלך זרימתו דרך הצינור הגמיש.
- **הצטברות מטען (על גבי הפיה המתכתית):** כאשר נוזל האחיל אצטט הטעון הגיע לפיה המתכתית בקצה הצינור הגמיש, הוא טען את פיית המילוי המתכתית במטען של חשמל סטטי.

⁹ תרמיש זה הינו פיצוץ כתוצאה מפריקת ניצוץ שנוצרה בעקבות הצטברות מטען חשמל סטטי על גבי גוף מתכתי שאינו מוארק / מגושר שתואר בסעיף הקודם.

• פריקת המטען:

- הרתע של הפיה המתכתית שנוצר במהלך המילוי (קפיצה קלה של הפיה המתכתית כלפי מעלה), יצר מרווח בין פיית המילוי הטעונה לבין המיכל המתכתי המוארק (כלומר נוצר הפרש פוטנציאלים בין פיית המילוי שטעונה במטען של חשמל סטטי למיכל המתכתי המוארק שהינו בפוטנציאל אפס).
- סביר להניח כי באזור פיית המילוי היתה אווירה נפיצה בשל המיהול של אדי האתיל אצטט עם האוויר.
- פריקת החשמל הסטטי בין פיית המילוי הטעונה לבין המיכל המתכתי, גרמה להצתת האווירה הנפיצה ולפיצוץ המיכל.

תרחיש ב' : מילוי בהתזה (Splash filling):

הפיזור לטיפות של האתיל אצטט באוויר במהלך התזתו מחלקו העליון של המיכל, גורם לטעינת טיפות הנוזל, להצטברות מטען חשמל סטטי עליהן ולפריקה. להלן ההסבר למנגנון זה :

- **היווצרות המטען:** השבירה של זרם האתיל אצטט לטיפות במהלך התזתו מחלקו העליון של המיכל גרם לטעינת טיפות הנוזל.
- **הצטברות מטען:** מטען החשמל הסטטי מצטבר על גבי טיפות הנוזל
- **פריקת המטען:** מתרחשת כתוצאה מהפרש הפוטנציאלים בין טיפות הנוזל הטעונות לבין דופן המיכל המוארק (שהינה בפוטנציאל אפס). במקרה זה הפריקה היתה פריקת ניצוץ.

🚩 **לקחים שנלמדו מהאירוע:**

- א. יש להשתמש בצנרת העשויה מחומר מוליך בלבד ולהבטיח רציפות חשמלית של אביזרי הצנרת המתכתיים לאורך כל מסלול זרימת הנוזל. כלומר, אין להשתמש בצנרת גמישה, אוגנים, ברזים וכד' העשויים מחומרים מבודדים אשר פוגעים ברציפות החשמלית ועלולים להביא להצטברות מטען חשמל סטטי על גבי הנוזל או גופים בלתי מוארקים/ מגושרים במערכת.
- באירוע זה, הצינור הגמיש היה עשוי מגומי ולכן מטען החשמל הסטטי שנוצר במהלך הזרימה בו לא נפרק עד להגעה לפיה המתכתית.
- ב. הארקת המיכל אינה מבטיחה שלא תתרחש פריקת חשמל סטטי במידה וקיים הפרש פוטנציאליים בינו לבין גוף אחר טעון. כלומר, במקרה וישנו גוף טעון במטען חשמל סטטי בסמוך למיכל המוארק (פיית המילוי בתאונה הנ"ל) עלולה להתרחש פריקת ניצוץ כתוצאה מהשוואת פוטנציאלים, דהיינו מעבר מטענים ביו הגוף הטעון למיכל המוארק.

5.1.3. בקורות מומלצות לצמצום הסתברות של פריקת ניצוץ:

- ✚ הארקה או גישור של כל הגופים המוליכים הקיימים במערכת ושמירת רציפות הארקה
- ✚ אחסון של נוזלים מוליכים צריכה להיעשות במכלים מתכתיים (או מכלים העשויים מחומר מוליך) ומוארקים.
- ✚ הזרמה של נוזלים מוליכים צריכה להיעשות רק בצנרת מתכתית (או מוליכה) ומוארקת.
- ✚ בדיקות תקופתיות של ההתנגדות החשמלית של ההארקה.

לפרטים נוספים ולקריאת דו"ח התחקיר המלא ראה:

[/https://www.csb.gov/barton-solvents-flammable-liquid-explosion-and-fire](https://www.csb.gov/barton-solvents-flammable-liquid-explosion-and-fire)

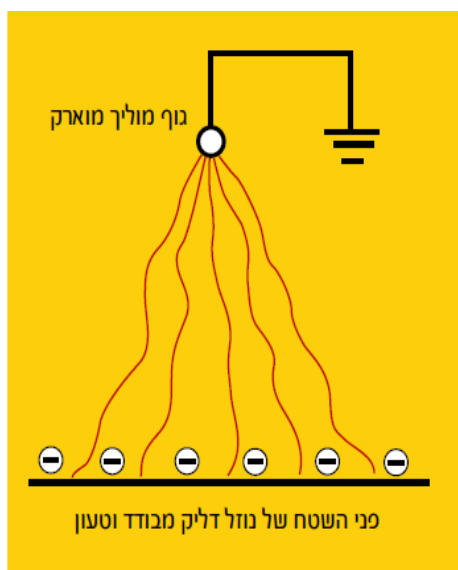
5.2. פריקת מברשת (Brush Discharge):

פריקת מברשת מתרחשת בין גוף מוליך מוארק (כגון אביזר מוארק בתוך מיכל אחסון מתכת) לבין נוזל בעל מוליכות נמוכה (נוזל מבודד).

5.2.1. תרחיש לפיצוץ עקב הצתה כתוצאה מפריקת מברשת:

פיצוץ כתוצאה מפריקת מברשת בעקבות הצטברות מטען חשמל סטטי על פני השטח של נוזל מבודד והכנסה של גוף מוליך מוארק קרוב לפני השטח של הנוזל

- **היווצרות המטען:** החיכוך של נוזל מבודד עם הצנרת במהלך זרימתו בצנרת אל המיכל גורם להיווצרות מטען חשמל סטטי
- **הצטברות מטען:** מאחר והנוזל הינו מבודד, קצב דעיכת המטען שנוצר על גבי הנוזל במהלך הזרימה הינו נמוך ומטען משמעותי של חשמל סטטי יצטבר על גבי הנוזל. כאשר נוזל טעון בעל מוליכות נמוכה מגיע למיכל אחסון מתכתי, דעיכת המטען אינה מיידית (מאחר והמוליכות נמוכה) ולכן המטען נשאר בו למשך זמן ממושך.
- **פריקת המטען:** הפריקה מתרחשת מפני השטח העליונים של הנוזל הטעון אל גוף מוליך מוארק, לדוגמא: פריקה מפני השטח של בניין הנמצא במיכל אחסון אל מוט דיגום מתכתי מוארק או אל מכשיר מדידת מפלס ידני. הפריקה מתרחשת משטח הפנים של הנוזל המבודד כלפי נקודה בגוף המוארק, ולכן נראית בצורה של מעין מברשת.



איור מס' 7: סקיצה של היווצרות פריקת מברשת

5.2.2. תאונה עקב פיצוץ שנגרם ככל הנראה בשל פריקת מברשת:

מה קרה? 🚧

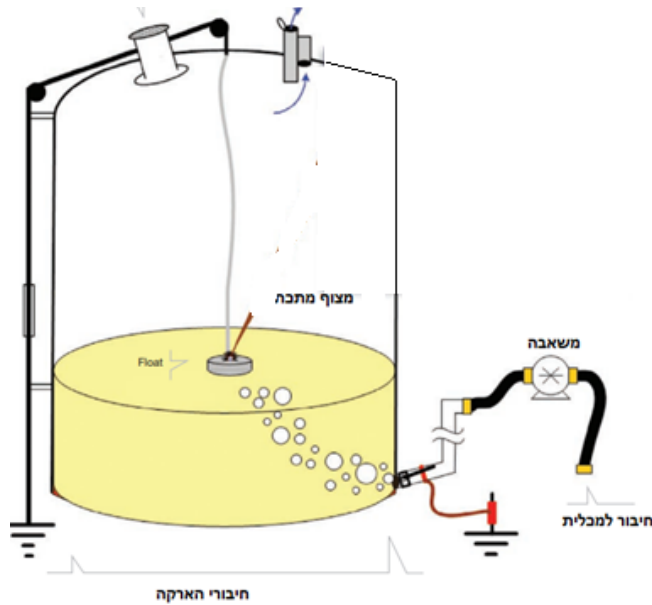
במפעל אחר של Barton Solvents בארה"ב מילאו מיכל מתכתי בנפטא (נוזל מבודד) בנפח של 56.5 מ"ק. כתוצאה מהכנסת אוויר למיכל במהלך המילוי, נוצרה אווירה נפיצה במיכל (תערובת של אדי נפטא דליקים עם אוויר), וכן נוצרו מערבולות במיכל שגרמו למרווח בין מצוף ששימש לצורך מדידת המפלס במיכל לבין פני הנוזל. ככל הנראה, התרחשה פריקה בין פני השטח של הנפטא במיכל לבין המצוף המתכתי שהינו מוליך מוארק. כתוצאה מהצתה, התבקע מיכל הנפטא בשל פיצוץ פנימי. האש שנוצרה בעקבות כך, גרמה להתבקעות שאר המכלים בחווה.

🚧 **תרחיש ההצתה בשל פריקת מברשת באירוע זה**¹⁰:

- **היווצרות המטען:** החיכוך של הנפטא (נוזל מבודד) עם הצנרת במהלך זרימתה גרם להיווצרות מטען חשמל סטטי על גבי הנפטא.
- **הצטברות מטען:** מאחר והנוזל הינו מבודד, קצב דעיכת המטען שנוצר על גבי הנוזל במהלך הזרימה הינו נמוך מאוד יחסית לקצב היווצרותו, ומטען משמעותי של חשמל סטטי הצטבר על גבי הנוזל. כאשר הנוזל הגיע למיכל אחסון מתכתי, קצב דעיכת המטען היה נמוך ולכן המטען נשאר בו למשך זמן ממושך.
- **פריקת המטען:** פני השטח של הנפטא היו כאמור טעונים במתקן חשמל סטטי. עקב מערבולות במיכל שנגרמו בשל כניסת אוויר עם הנפטא, נוצר מרווח בין המצוף של

¹⁰ הערה: לפי התחקיר של ה-CSB יתכן שהגורם לאירוע היה ניצוץ כתוצאה מחיכוך מכאני בשל חיבור רופף.

מד הגובה לבין פני השטח של הנוזל במיכל. כתוצאה מכך, התרחשה פריקה בין פני השטח של הנוזל לבין המצוף המוליך המוארק.



איור מס' 8; סקיצה של מיכל הנפטא שהיה מעורב באירוע

לקחים שנלמדו מהאירוע:

- א. במכלים המשמשים לאחסון נוזלים מבודדים אין להשתמש באביזרים (כגון מד מפלס) מוליכים ומוארקים שעלולים לגרום לפריקת מברשת. בתאונה הנ"ל, במידה ומצוף מד המפלס היה עשוי מפלסטיק או שלא היה מוארק, ככל הנראה לא הייתה מתרחשת פריקת מברשת.
- ב. יש לוודא קיום אווירה אינרטיית במכלים בהם עלולה להיווצר אווירה נפוצה או לחלופין להשתמש במכלים עם גג צף.

לפרטים נוספים ולקריאת דו"ח התחקיר המלא ראה:

[/https://www.csb.gov/barton-solvents-explosions-and-fire](https://www.csb.gov/barton-solvents-explosions-and-fire)

5.2.3. תאונות נוספות דומות שנגרמו בשל פריקת מברשת:

- תאונות קטלניות שאירעו כתוצאה מדיגום או מדידת מפלס של מכלי דלקים:
- תאונה קטלנית שאירעה ב- 10.2.25 בחוות מכלים בעיירה Ulsan¹¹ בדרי קוריאה במהלך מדידת מפלס של מכל בנוזל.
- תאונה קטלנית שאירעה ב- 2.11.97 בבית הזיקוק באשדוד¹², בה במהלך דיגום מיכל סולר (אשר בשל תקלה תפעולית הכיל גם מימן).

¹¹ ראה קישור לתאונה:

[Oil Tank at Ulsan Plant Explodes, Killing 1 Worker, Injuring Another | KBS WORLD](https://www.kbsworld.com/news/Oil-Tank-at-Ulsan-Plant-Explodes-Killing-1-Worker-Injuring-Another-1)

¹² ראה קישור לתאונה:

<https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/prs.680210110>

5.2.4. בקרות מומלצות למניעת פריקת מברשת:

- הימנעות מהכנסת מוליך מוארק (כגון כלי דיגום או מכשיר למדידת מפלס) לפני השטח של נוזל מבודד טעון.
- כאשר ישנו מכל המכיל נוזל מבודד טעון, יש:
 - למנוע מצב של המצאות גופים מוליכים מוארקים בקרבת פני השטח של הנוזל (כגון מוט דיגום, מד מפלס או מצוף מד גובה מוליך ומוארק).
 - להשתמש בציוד אנטיסטטי.
 - זמן המתנה מספיק לאחר מילוי המכל בכדי לאפשר למטען הצבור על גבי הנוזל להתפרק (לדוגמא: מקובל להמתין 30 דקות לפחות אחרי מילוי מיכל עם נוזלים מבודדים לפני ביצוע דיגום ממנו).
- הקטנת מהירות הזרימה של נוזלים מבודדים (רצוי לפחות מ-1 מטר/שניה) בקווים המובילים למיכל.
- יש לוודא אווירה אינרטי (במכלים בהם עלולה להיווצר אווירה נפיצה או לחלופין להשתמש במכלים עם גג צף).

5.3. פריקת מברשת מתגלגלת (Propagating Brush Discharge):

פריקת מברשת מתגלגלת עלולה להתרחש במצבים הבאים:

כאשר קיים משטח של חומר מבודד הנמצא צמוד או ליד גוף העשוי מחומר מוליך ומוארק, או משטח העשוי שכבה דקה של חומר מבודד (פחות מ- 8 מ"מ) שבו צד אחד של המשטח טעון במטען חשמלי חיובי והצד השני טעון במטען חשמלי שלילי, המשטח ישמש כמעין קבל הצובר מטען של חשמל סטטי. כאשר צפיפות המטען הנצטבר עולה מעל $250 \mu\text{C}/\text{m}^2$, תתרחש פריצה של החומר המבודד של המשטח, ותיווצר פריקת מברשת מתגלגלת על שכבת הציפוי של החומר המבודד.

5.3.1. תרחישים אפשריים לפיצוץ עקב הצתה כתוצאה מפריקת מברשת מתגלגלת:

- היווצרות המטען: החיכוך של הנוזל עם הצנרת במהלך זרימתה גרם להיווצרות מטען חשמל סטטי על גבי הנוזל ועל גבי הגוף העשוי מחומר מבודד.
- הצטברות מטען: מטען החשמל הסטטי מצטבר על פני הגוף העשוי מחומר מבודד
- פריקת המטען: המטען שהצטבר על גבי הגוף העשוי מחומר מבודד פורץ את הבידוד / ציפוי.

דוגמאות:

א. הזרמת נוזל דליק בצנרת מוליכה עם ציפוי פנימי העשוי מחומר מבודד (לדוגמא צנרת פלדה עם בידוד פנימי של PVDF). במקרה של חור או נקודת חולשה בציפוי הפנימי בשילוב נוכחות אוויר (אווירה נפיצה) התרחשה הצתה ופיצוץ

- ב. הזרמת נוזל דליק בצנרת גמישה כאשר הציפוי הפנימי עשוי מחומר מבודד (לדוגמה טפלון) והוא עטוף צמה מתכתית. במקרה של חור בציפוי הפנימי בשילוב נוכחות אוויר (אווירה נפיצה) התרחשה הצתה ופיצוץ.
- ג. הזרמת נוזל דליק בצנרת גמישה מפלסטיק אשר בדופן שלה קיים סליל מתכת- שאינו מוארק

כאשר שני הצדדים של חומר בלתי מוליך נטענים בקוטביות שונה במידה ומתרחש קצר בין שני הצדדים עקב פריצה חשמלית מצד לצד, עלולה להתרחש פריקת מברשת מתגלגלת המלווה בד"כ בשחרור אנרגיה רבה.

- **היווצרות המטען:** החיכוך של הנוזל עם הצנרת במהלך זרימתה גרם להיווצרות מטען חשמל סטטי על גבי כל אחד מהצדדים.
- **הצטברות מטען:** מטען החשמל הסטטי מצטבר על פני כל אחד מהצדדים
- **פריקת המטען:** הפרש הפוטנציאליים בין שני הצדדים יגרום לפריצה חשמלית בין שני הצדדים.

5.3.2. בקרות מומלצות למניעת פריקת מברשת מתגלגלת:

- הימנעות ככל האפשר משימוש באביזרים או ציודים בהן יש שכבה של חומר מבודד הצמודה לשכבה של חומר מוליך.
- במקרה בו חייבים להשתמש בשכבה של חומר מבודד הצמודה לשכבה של חומר מוליך (כמו לדוגמה במקרה של צנרת גמישה), יש למזער את ההסתברות לפריקת מברשת מתגלגלת ע"י:
 - ווידוא שמתח הפריצה של השכבה המבודדת הינו נמוך מ- 4 kV ושהשכבה המוליכה מחוברת להארקה או מגושרת.
 - שימוש בשכבה מבודדת בעובי של פחות מ- 2 מ"מ או מעל 10 מ"מ.

6. תרחישי פריקת חשמל סטטי במהלך פעילויות נפוצות:

התרחישים המפורטים בפרק זה, עלולים להתרחש כתוצאה מפריקת חשמל סטטי במנגנונים שפורטו בפרק הקודם:

6.1. מילוי בהתזה (Splash Filling):

פריקת חשמל סטטי כתוצאה ממילוי בהתזה יכולה להיווצר כאשר מאפשרים לנוזל לזרום בנפילה חופשית או להיות מותז במהירות גבוהה על תחתית המיכל או על דפנותיו או על פני השטח של הנוזל שנמצא כבר במיכל. פריקת החשמל הסטטי מתרחשת בעקבות היווצרות מטען חשמל סטטי גבוה על טיפות קטנות היוצרות מעין ערפל (charged mist) בשל הטורבולנציה באוויר הנוצרת במהלך המילוי.

- **היווצרות המטען:** השבירה של זרם הנוזל לטיפות גורמת להיווצרות מטען חשמלי.

- **הצטברות מטען:** מטען החשמל הסטטי מצטבר על פני הנוזל (נוזל מוליך או מבודד).
- **פריקת המטען:** כתוצאה מהפרש פוטנציאליים בין המטען שהצטבר על גבי הנוזל לבין דופן המיכל / אביזרי צנרת.

6.1.1. תאונה עקב פיצוץ שנגרם כתוצאה ממילוי בהתזה (בית זיקוק של חבר' Shell ב-Pernis הולנד):

במהלך מילוי מכלית סולר דרך פתח עילי ללא שימוש בטובלן, הוצת הסולר במכלית. למרות שנקודת ההבזקה של סולר היא יחסית גבוהה (כ-60°C), היווצרות הטיפות הקטנות / ערפל במהלך המילוי בהתזה גרם להצתת אדי הסולר בטמפ' הנמוכה מנקודת ההבזקה שלו.

- **לקחים שנלמדו מהאירוע:**
 - א. אין למלא מכלים דרך הפתח העליון ללא שימוש בטובלן בכדי למנוע את היווצרות והצטברות המטען על גבי טיפות הנוזל כתוצאה מהתזה, גם כאשר מדובר על נוזלים עם נקודת הבזקה גבוהה יחסית.
 - ב. רצוי להקפיד על מהירות מילוי נמוכה ככל האפשר.

לפרטים נוספים על האירוע ראה:

<https://www.icheme.org/media/10872/ici126.pdf>

6.1.2. בקרות מומלצות למניעת פריקת חשמל סטטי בשל מילוי בהתזה:

- שימוש בטובלן קשיח העשוי מחומר מוליך המגושר (נמצא ברציפות חשמלית) עם צנרת המילוי. רצוי שהטובלן יגיע עד תחתית המיכל (רצוי שיהיה במגע עם התחתית בכדי למנוע טורבולנציה) ושהחומר ייצא בשיפוע של 45 מעלות מתחתית הטובלן.
- המהירות ההתחלתית צריכה להיות לכל היותר 1 מטר/שניה¹³ (עד שהטובלן שקוע בנוזל בגובה של לפחות 2 קטרים של הטובלן או 61 ס"מ, הנמוך מביניהם).
- גישור בין המכל מילוי לצינור ההזנה
- שימוש במילוי תחתי- מילוי המיכל/ מכלית מחיבור הנמצא בתחתיתו במקום מילוי מחלקו העליון של המיכל.
- ה. בקצה צינור המילוי (גם במילוי עילי וגם במילוי תחתי) מומלץ להתקין מפצל בעל צורת T להסתת זרם הנוזל במקביל לקרקעית המכל (spray deflector).
- ו. הורדת ריכוז החמצן במיכל למינימום האפשרי לפני תחילת המילוי.

¹³ הערה: במקרה של נוזל מבודד המכיל מוצקים מרחפים, יש להקפיד על מהירות מקסימלית של 1 מטר/שניה במהלך כל המילוי.

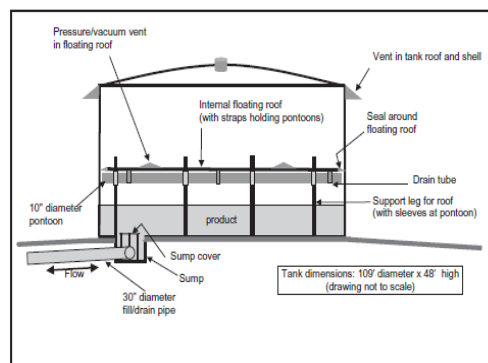
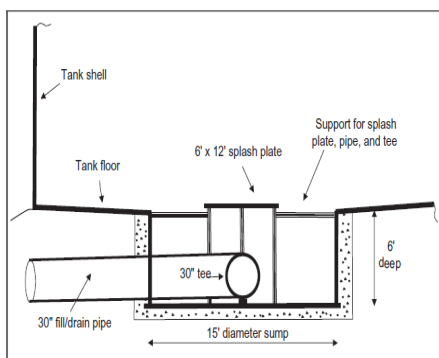
6.2. החלפת תכולה (Switch Loading):

פריקת חשמל סטטי זו מתרחשת כאשר ממלאים מיכל או מכלית שמכיל אדי נוזל דליק בעל לחץ אדים גבוה, כגון אדי בנזין, עם נוזל בעל לחץ אדים נמוך (לדוגמא: סולר, שמן חימום, שמן סיכה).

- **היווצרות המטען:** החיכוך של הנוזל עם הצנרת בקו המילוי של המיכל יגרום להיווצרות מטען חשמל סטטי.
- **הצטברות מטען:** מטען החשמל הסטטי עלול להצטבר על פני הנוזל המתמלא במיכל.
- **פריקת המטען:** פריקת המטען עלולה להתרחש כתוצאה מהפרש הפוטנציאלים בין פני שטח הנוזל לבין דופן המיכל או אביזרי צנרת.

6.2.1. תאונה עקב פיצוץ שנגרם כתוצאה ממילוי בהתזה

מיכל עם גג צף בחוות המכלים של Conoco Phillips שהכיל בנזין, רוקן ונוקז, אך עדיין הכיל אווירה נפיצה של אדי בנזין בין תחתית המכל לגג הצף (שניצב על גבי הרגליים שלו). למיכל הוכנס סולר במהירות של 3 מטר/שנייה. הכנסת הסולר גרמה להצטברות מטען חשמלי בסולר שבמיכל מחד ולפריקת חשמל סטטי כתוצאה ממהירות הזרימה הגבוהה מאידך. פריקת החשמל הסטטי גרמה להצתה ולפיצוץ המיכל. הפיצוץ לווה בשריפה שנמשכה 21 שעות, פגעה ב-2 מכלים נוספים וגרמה לנזק ישיר של 2.5 מיליון דולר.



איורים (מס): 9; סקיצות של המיכל בו התרחש הפיצוץ בשל switch loading



תמונות מס' 21, 22: המיכל לאחר הפיצוץ

לדו"ח האירוע המלא, ראו:

<https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/PAR0402.pdf>

6.2.2. בקרות מומלצות:

- א. הקטנת מהירות הזרימה בקו המילוי לפחות מ-1 מטר/שניה (הכפלת שטח החתך של הצנרת (ביחידות של מ² ב-1 מטר/שניה ייתן את הספיקה המקסימלית במ³/שניה).
- ב. טיהור מכל המכיל אדי נוזל בעל לחץ אדים גבוה (כלומר יצירת אוירה אינרטיה במכל) לפני החלפת תכולתו.

6.3. פריקת חשמל סטטי במהלך שימוש בביוביות (מכלית ואקום) לצורך שאיבת נוזלים

דליקים:

פריקת חשמל סטטי עלולה להתרחש במהלך שימוש בביוביות, כתוצאה מזרימה של נוזל דליק בצנרת גמישה מבודדת. בד"כ בזמן זרימה זו קיימת אוירה נפיצה במכל של המכלית בשל נוכחות אויר ואדי הנוזל הדליק ולכן פריקת החשמל הסטטי עלולה לגרום להצתה.

- **היווצרות המטען:** החיכוך של הנוזל עם הצנרת במהלך זרימתו גורם להיווצרות מטען חשמל סטטי.
- **הצטברות מטען:** מטען חשמל סטטי עלול להצטבר על פני הנוזל במכל
- **פריקת המטען:** הפרש הפוטנציאלים בין המטען שהצטבר על גבי הנוזל לבין גוף אחר בתוך המכל עלול לגרום לפריקת חשמל סטטי.

6.3.1. בקרות מומלצות:

- התקנת מערכת הארקה לחשמל סטטי על הביוביות¹⁴.
- ביצוע בדיקה דו-שנתית למערכת הארקה, המאשרת את תקינות ורציפות ההארקה.
- לפני כל מילוי או פריקת חומר מהביוביות, יש לוודא כי היא מחוברת להארקה.

¹⁴ מערכת הארקה המכלית תתאים לדרישות ADR (האמנה האירופאית להובלת חומ"ס).

- במהלך הטעינה/פריקה- יש להשתמש רק בצנרת מתכתית ו/או צנרת גמישה שאושרה ע"י מעבדה מוסמכת כאנטיסטטית עם רציפות חשמלית לפי ת"י 60079 או ATEX.
- לפני כל מילוי או פריקת חומר מהביובית, יש לוודא כי היא מחוברת להארקה.
- יש לדאוג להפניית האדים שיוצאים מנשם מכל המכלית, באמצעות צנרת גמישה, למקום בטוח, המרוחק לפחות 15 מטרים מרחק אופקי מהמכלית.



תמונה מס' 23 ; דוגמא להפניית האדים מביובית למקום בטוח באמצעות צנרת גמישה

6.4. פריקת חשמל סטטי במהלך מילוי או ריקון מכלי קובייה:

- "קובייה" (Intermediate Bulk Container) היא כלי קיבול שנפחו בד"כ 1000 ליטר העשויה ממעטפת פוליאיתלן שמסביבה כלוב הגנה מתכתי.
- קוביות אלה נמצאות בשימוש נפוץ בתעשייה לצורך אחסון ביניים ו/או שינוע של נוזלים בכלל, ובין היתר גם של נוזלים דליקים. במקרה של אש בקובייה או בקרבתה, מעטפת הפלסטיק של הקובייה תותך תוך זמן קצר ולגרום לשפך הנוזל, שעלול להידלק ולהצית חומרים דליקים ובעירים אחרים הנמצאים בקרבת מקום.
- במקרה ובסמוך לשפך הנוזל הדליק הבוער ניצבות קוביות נוספות המכילות נוזלים דליקים, קיים סיכוי גבוה שגם קוביות אלה יותכו, ותכולת הנוזלים הדליקים שבהן תתווסף לשפך הבוער ותלבה אותו. בשל הכמות הגדולה של נוזלים דליקים המעורבים בשפך הבוער, תרחיש זה מהווה בד"כ אתגר קשה לצוותי החירום וכיבוי האש המטפלים בשריפה. לעיתים קרובות מסתיים האירוע באיבוד השליטה על האש ובנזק כבד לרכוש, ולעיתים גם בנפגעים בנפש, וזאת גם במקרים בהם קיימת מערכת מתזים (ספרינקלרים) באזור השריפה.
- **היווצרות המטען:** החיכוך של הנוזל עם הצנרת במהלך זרימתה גורם להיווצרות מטען חשמל סטטי, הן במהלך מילוי והן במהלך ריקון של נוזלים דליקים בקוביות.

- **הצטברות מטען:** מטען החשמל הסטטי עלול להצטבר על פני הנוזל, על מעטפת הפלסטיק של הקובייה או על פני מעטפת ההגנה המתכתית של הקובייה (במידה והיא לא מוארקת / מגושרת).
 - **פריקת המטען:** פריקה אלקטרוסטטית של מטענים אלה באחד מהמנגנונים שתוארו בסעיף הקודם עלולה לגרום להצתת אדי הנוזל הדליק הנמצאים בחלל הקובייה.
- 6.4.1. בקרות מומלצות ע"י ת"י 60079 חלק 32 "אטמוספירות נפיצות - סיכוני חשמל סטטי" (תקן זה זהה לתקן IEC 60079):**
- א. מומלץ להימנע מעבודה בקוביות עם נוזלים דליקים מבודדים בעלי התנגדות הגבוהה מ 108- אוהם/מטר, מאחר וחומרים אלה יכולים לצבור כמות גבוהה של מטענים וכתוצאה מכך לא ניתן למנוע את האפשרות להיווצרות פריקת מברשת.
 - ב. אין להשתמש בקוביות עבור נוזלים בעלי אנרגיית הצתה מינימלית, MIE, של 20 mJ (מילי ג'אול) או פחות, מכיוון שהסבירות שנוזלים אלה יוצתו כתוצאה מפריקת חשמל סטטי היא גבוהה.
 - ג. כאשר נעשה שימוש בטובלן פלסטיק, מטענים של חשמל סטטי יכולים להצטבר בחלקו הפנימי של הטובלן. כמות המטען אשר יכולה להצטבר עולה ביחס ישר לעובי הטובלן ולקוטרו. לכן כאשר נעשה שימוש בטובלן העשוי מחומר מבודד כגון פלסטיק, רצוי שהתנגדותו הנפחית תהיה פחות מ- 108 100 MΩ אוהם). טובלנים המוגדרים ע"י היצרן dissipative מקיימים דרישה זו.
 - ד. יש להשתמש בטובלן ארוך למרחק של כ-20 ס"מ מהתחתית בעת מילוי קוביות. במידה ולא ניתן להשתמש בטובלן יש לוודא שמהירות הזרימה נמוכה מ 1- מטר/שנייה ה. לפני כל שימוש בקובייה, יש לחבר את המסגרת המתכתית של הקובייה להארקה, מאחר וחיבור זה מסיט את המטענים הסטטיים בנוזל אל הדפנות ומסייע למנוע פריקה אלקטרוסטטית אל הטובלן או ממנו אל הנוזל.
 - ו. בעבודה עם נוזלים מוליכים (כגון: אצטון, אלכוהול) יש לוודא ויזואלית את הרציפות החשמלית (כלומר, לוודא היעדר מתכות צפות במערכת).
 - ז. יש לבצע את מילוי / ריקון הקובייה כאשר משטחי העבודה - הן המשטח עליו עומד העובד והן המשטח שעליו ממוקמת הקובייה הם מוליכים. לדוגמה: מומלץ שהעבודה תתבצע על גבי משטח מבטון (שהוא חומר מוליך) ולא על משטח אספלט (שהוא חומר מבודד).
 - ח. המפעיל המבצע את המילוי / הריקון של הקובייה צריך להיות מצויד בביגוד אנטיסטטי (ביגוד המכיל 35% כותנה לפחות) ובנעלי עבודה עם סוליה אנטי סטטית.

6.5. פריקת חשמל סטטי במהלך ניקוי מכלים המכילים אוירה נפיצה עם נוזל בלחץ:

ניקוי מכלים עם נוזל בלחץ יוצר לעיתים קרובות אירוסולים / ערפל. מאחר וטיפות הנוזל אינן נמצאות ברציפות חשמלית אחת עם השנייה, מנגנון הטעינה אינו תלוי במוליכות הנוזל. בנוסף, מאחר ופריקת המטען דורש שהערפל יהיה בפאזה הנוזלית, תהליך הפריקה יכול להמשך עד חמש שעות.

- **היווצרות המטען:** החיכוך של הנוזל עם הצנרת והאוויר במהלך זרימתו גורם להיווצרות מטען חשמל סטטי. במהלך ניקוי מיכל עם סילון מים או בעזרת spray ball, עלול להיווצר מטען גבוה אשר יגרום לפריקת מברשת בין האירוסול / ערפל ומוליכים מוארקים במערכת.
- **הצטברות מטען:** מטען החשמל הסטטי עלול להצטבר על פני הנוזל, בקצף שנוצר על פני הנוזל ועל גבי אלמנטים של מתכת צפה בציוד (אלמנטים של מתכת שאינה מוארקת/ מגושרת).
- **פריקת המטען:** הפרש הפוטנציאלים בין המטען שהצטבר על גבי הנוזל לבין גוף אחר בתוך המכל עלול לגרום לפריקת חשמל סטטי.

6.5.1. בקורות מומלצות:

- א. מניעת היווצרות אירוסול/ ערפל (לדוגמה ע"י תכנון כך שקו הכניסה למיכל יהיה טבול בנוזל ומהירות הנוזל תהיה נמוכה).
- ב. במידה ולא ניתן למנוע את היווצרות האירוסול / ערפל, יש לוודא שהאווירה בכל המערכת היא אינרטי.
- ג. מניעת המצאות אלמנטים המהווים מתכת צפה (הארקה/ גישור של כל האלמנטים במערכת).

6.6. פריקת חשמל סטטי כתוצאה משימוש בצנרת גמישה עם סליל מתכתי פנימי:

- **היווצרות המטען:** החיכוך של הנוזל עם הצנרת הגמישה במהלך זרימתו גורם להיווצרות מטען חשמל סטטי.
- **הצטברות מטען:** מטען החשמל הסטטי עלול להצטבר על גבי הסליל המתכתי (טעינת הסליל תתבצע בהשראה ע"י הנוזל הטעון).
- **פריקת המטען:** הפרש הפוטנציאלים בין המטען שהצטבר על גבי הסליל המתכתי לבין גוף אחר עלול לגרום לפריקת חשמל סטטי.

6.6.1. בקורות מומלצות:

שימוש בצנרת גמישה אנטיסטטית, עם/ללא סליל מתכתי פנימי

7. בקורות מקובלות להקטנת ההסתברות לפריקת חשמל סטטי:

היררכיית הבקורות :



איור מס' 24; היררכיית הבקורות

7.1. אוירה אינרטית:

7.1.1. מומלץ להשתמש בחנקן¹⁵ כדי ליצור אוירה אינרטית בצידוד תהליכי לפני ביצוע פעולה

כלשהי העלולה לגרום ליצירת חשמל סטטי (לדוגמא: מילוי המיכל).

7.1.2. אין להשתמש בקיטור לצורך יצירת אוירה אינרטית במיכל או בצידוד, מאחר וקיטור

רווי ("קיטור רטוב") עלול ליצור מטעני חשמל סטטי.

7.1.3. אין להשתמש בפחמן דו חמצני (CO₂) ליצירת אוירה אינרטית, מאחר ובשימוש

בפחמן דו חמצני עלולים להיווצר חלקיקי קרח יבש בגלל שינוי הלחצים, והתפזרות סילון החלקיקים באוויר גורמת למטען חשמלי מנוגד בחלקיקים גדולים וקטנים. כאשר חלקיקי קרח יבש גדולים וקטנים נפגשים ביניהם או פוגעים בגוף ממתכתי תיתכן הצתה של האוירה הנפיצה הקיימת.

7.2. שינוי בתהליך

7.2.1. קירור הנוזלים הדליקים לטמפי של פחות מ-11°C מהטמפי של החומר בעל נקודת

ההבזקה הנמוכה ביותר הנמצא בצידוד

7.2.2. שימוש במכלים עם גג צף או מילוי המיכל עד הסוף (בכדי למנוע חלל עם אווירה של

אדים נפיצים.

¹⁵ ליצירת אוירה אינרטית בצידוד התהליכי ניתן להשתמש גם בגזים אחרים (כגון הליום), אולם בשל העלות הגבוהה יחסית של גזים אלו, שימוש זה אינו מקובל בתעשייה.

7.2.3. מניעת מילוי נוזלים בעלי לחץ אדים נמוך בטמפ' גבוהה
7.2.4. מניעת מילוי נוזלים בעלי לחץ אדים גבוה בטמפ' נמוכות (עלולים להיות בתחום הנפיצות).

7.2.5. שינוי סדר ההזנה- לדוגמא: הזנת מוצקים לפני הזנת נוזל דליק

7.2.6. הורדת מהירות הזרימה:
 מהירות המילוי צריכה להיות נמוכה מ-1 מטר/שניה¹⁶. לאחר שצינור המילוי טבול כולו בנוזל ניתן להעלות את מהירות / ספיקת הנוזל¹⁷.

7.2.7. הארקה וגישור:

- כל המכלים והציוד התהליכי המכיל נוזלים או גזים דליקים חייב להיות מוארק או מגושר.
- בעת עבודה עם מכלים ניידים (חביות, קוביות וכד') יש לוודא את הארקה המכלים או גישורם לפני תחילת המילוי או הריקון שלהם. אין לחבר הארקה למיכל נייד תוך כדי מילוי מאחר והדבר עלול לגרום להצתה.
- במידה ונדרש לנתק את חיבורי ההארקות / גישורים, הניתוק יתבצע רק לאחר סיום התהליך/ ההזרמה.
- יש לוודא כי חיבור הארקה חזק דיו ואינו עלול להשתחרר במהלך ביצוע מילוי / ריקון המכל.
- צנרת המילוי / פריקה ממכלים ניידים צריכה להיות אנטיסטטית בכדי לאפשר רציפות חשמלית ולהבטיח את אפקטיביות הארקה.
- מומלץ להשתמש במערכות הארקה "חכמות" המאפשרות את ווידוא תקינות הארקה (לדוגמא: ניתן להתנות (ע"י חיגור חשמלי) את הפעלת משאבת ריקון ממכלית בכך שחברה אליה הארקה תקינה).
- יש לדאוג להארקה/ גישור של כל האלמנטים המתכתיים הקיימים בתהליך (לרבות אביזרי צנרת)
- יש לוודא קיום רציפות חשמלית, כלומר התנגדות נמוכה מ- 1 אוהם בין שני קצוות המקטע הנבדק¹⁸

¹⁶ הכפלת שטח החתך של הצנרת (ביחידות של מ²) ב- 1 מטר/שניה ייתן את הספיקה המקסימלית המומלצת במ3/שניה. כ' אשר צינור המילוי טבול כולו בנוזל ניתן להעלות את מהירות / ספיקת הנוזל עד למהירות הנמוכה מבין האפשרויות הבאות:

א. 7 מטר/שניה
 ב. d/0.38 (כאשר d הוא הקוטר הפנימי צינור המילוי במטרים). בתנאים מסוימים ניתן להעלות את המהירות d/0.5 -
 ראה table 1 בתקן API2003
¹⁸ (תקן API 2003 מאפשר גם התנגדות של עד 10 אוהם, אולם התנגדות מעל 1 אוהם מצביעה לעיתים קרובות על כשלים ברציפות החשמלית ולכן מומלץ לבצע בדיקה יסודית של כל מרכיבי המערכת, לרבות המצאות קורוזיה, חלקים רופפים וכד', לפני אישור מערכת עם התנגדות של מעל 1 אוהם).

- בכל מקרה של שימוש בצינורות גמישים בעלי סליל מתכתי פנימי, יש לבדוק את ההתנגדות החשמלית בין שני קצותיו של כל צינור גמיש ולוודא שהיא פחות מ-1 אוהם.
- בתכנון המערכת יש להבטיח זמן שהייה של לפחות 30 שניות בין משאבות ומסננים לבין מכלים (עבור נוזלים בעלי מוליכות של פחות מ-2 $\rho S/m$ מומלץ להבטיח זמן שהייה של לפחות 100 שניות). – להעביר למקום מתאים יותר

7.2.8. לבוש:

- מומלץ להשתמש בבגדים המכילים 100% כותנה. במידה ונעשה שימוש בבגדים המכילים פחות מ-35% כותנה יש לוודא קיום אישור מתאים ממעבדה מוסמכת להיותם אנטיסטטיים).
- **נעלי עבודה:** הנעליים צריכות להיות עם התנגדות חשמלית בתחום 1–100 M Ω , בכדי לאפשר דעיכת מטעני חשמל סטטי לפי ת"י 60079 חלק 32, ובהתאם לת"י 12546 – "נעלי בטיחות לעובדים" (תקן זה מבוסס על תקן EN ISO 20345).

7.2.9. משטחים וריצוף:

- **חיפוי מגן לשולחנות עבודה:** לצורך עבודה עם חומרים מסוכנים על גבי שולחנות עבודה, יש לצפות את השולחן בחיפוי מתאים (חיפוי מוליך או מפזר מטענים – static dissipative) כך שזמן הדעיכה של מטען סטטי בגוף טעון הבא במגע עם כסוי המגן יהיה קצר מ-2 שניות.¹⁹
- **חיפוי מגן לרצפה:** ההתנגדות החשמלית הרצויה של חיפוי המגן לרצפה (לדוגמה חיפוי בצבע אפוקסי) צריכה להיות בין 100,000 אוהם ל-100 מיליון אוהם. המדידה צריכה להתבצע בין נקודת הארקה ישירה (הארקת היסוד) לבין אלקטרודה המונחת בנקודה כלשהי על חיפוי הרצפה, לפי ת"י 60079 חלק 32.

7.2.10. בקרות מקובלות לשימוש במכליות:

- למרות שביצוע מילוי תחתי (מילוי) דרך חלקו התחתון של המיכל או המיכלית) נחשב כבטוח יותר ממילוי עילי, עדיין קיים במילוי זה סיכון ליצירת חשמל סטטי כתוצאה מהתזת טיפות הנוזל כלפי מעלה ולכן יש לוודא:
- שימוש בלוחית ייעודית בפתח הצינור במכל למניעת התזת הנוזל כלפי מעלה (spray deflector)
- מהירות זרימה מקסימלית של 1 מטר/שניה (לפחות עד שצינור המילוי טבול בנוזל בגובה של לפחות שני קטרי צינור המילוי מעל חלקו העליון או 61 ס"מ (הנמוך מביניהם).

¹⁹ זמן הטעינה הוא הזמן הדרוש לפיזור המטען הסטטי מהגוף הטעון עד שגודל המטען יורד ל-10% מרמתו המקורית.

8. מידע נדרש לצורך ניתוח תרחישים:

על מנת לנתח את תרחישי ההצתה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי יש להתייחס לנתונים הבאים:

• פרמטרים פיזיקליים/ כימיים של החומר:

- i. **נק' ההבזקה של הנוזל:** ככל שנק' ההבזקה של הנוזל נמוכה יותר מהטמפ' בה נמצא הנוזל בתהליך, כך הסבירות להיווצרות אווירה נפיצה גבוהה יותר.
 - ii. **לחץ האדים של הנוזל:** ככל שלחץ האדים של הנוזל גבוה יותר, כך הסבירות להיווצרות אווירה נפיצה גבוהה יותר.
 - iii. **טמפ' הנוזל:** ככל שטמפ' הנוזל גבוהה יותר, כך הסבירות להיווצרות אווירה נפיצה גבוהה יותר.
 - iv. **מוליכות חשמלית של הנוזל בטמפ' השימוש בו** (המוליכות קטנה משמעותית עם ירידת הטמפ'). במדידת מוליכות של דוגמאות יש לוודא שהדוגמא שנלקחה היא אכן דוגמא מייצגת וכי נלקחו בחשבון הטעויות בביצוע המדידה (מומלץ לבצע את המדידה בעזרת שני מכשירים שונים ואם המדידה מתבצעת בשטח רצוי גם בשני מיקומים שונים).
- ברוב במקרים, ככל שמוליכות הנוזל נמוכה יותר כך יש צורך בזמן שהייה ארוך יותר בכדי לאפשר את פריקת המטענים בצורה בטוחה. כזכור, רצוי שזמן ההתפרקות בשניות יהיה לפחות $3t$ כלומר $3 \cdot 18/s$ כאשר s היא מוליכות הנוזל [pS/m].
- במקרה של שימוש בנוזלים בעלי מוליכות של פחות מ- 2 pS/m , קיים סיכון גבוה לפריקת חשמל סטטי וכן יש לוודא קיום בקרות מתאימות.

• פרמטרים תהליכיים:

- i. **זיהומים אפשריים בנוזל** (כגון נוכחות מים) יכולים להגדיל באופן משמעותי את המוליכות.
- ii. **זרימה דו-פאזית** או הימצאות חלקיקי מוצק בנוזל יגבירו מאוד (פי 10-1000) את המטען החשמלי שיווצר בנוזל.
- iii. **מהירות הזרימה** במקטעים השונים. ככל שמהירות הזרימה גבוהה יותר כך קצב היווצרות מטען החשמל הסטטי יהיה גבוה יותר והסבירות לפריקת חשמל סטטי תהיה גבוהה יותר.
- iv. **מיקום כניסת הנוזל למיכל:** כניסת נוזל מחלקו העליון של המיכל עלולה לגרום לפריקת חשמל סטטי במנגנון מילוי בהתזה (Splash filling), ומצד שני ההסתברות להצתה במהלך מילוי מתחתית המיכל לתוך פאזה נוזלית הוא נמוך.
- v. **זמן שהייה** בתהליך לאחר מעבר דרך אביזרים היוצרים חיכוך/ טורבולנציה גבוהים (לדוגמא: אחרי פילטרים).
- vi. **שימוש באביזרים (כגון מדי מפלס, צנרת גמישה) שאינם אנטיסטטיים** או מיועדים לעבודה בסביבה נפיצה (לדוגמא בעלי אישור ATEX). ככלל, מומלץ להימנע משימוש באביזרים אלו ככל הניתן.

vii. שימוש בציודים העשויים מחומרים מבודדים (לדוגמא קוביות IBCs) לצורך שינוע / טיפול בנוזלים דליקים או נוזלים בעלי לחץ אדים גבוה או בינוני.

viii. פעולות ידניות המתבצעות בציוד: יש לבחון אופן ביצוע הדיגום או מדידת מפלס ידני והציוד בו נעשה שימוש לצורך כך, על מנת לבחון את הסבירות לפריקת מברשת.

8.1. השפעות הלחות:

הסבירות לפריקת חשמל סטטי בגזים קטנה עם עליית אחוז הלחות היחסית באוויר בשל הסיבות הבאות:

i. הולכת מטען החשמל הסטטי על גבי משטחים:

בסביבה בה קיימת לחות יחסית גבוהה, נוצרת שכבת לחות דקה על פני משטחים (כגון צינורות, רצפות וציוד). שכבת לחות זו משפרת את המוליכות, ומאפשרת למטען החשמלי להתפזר לדעוך בצורה בטוחה, במקום להצטבר עד לרמה העלולה לגרום לפריקה.

ii. הגברת קצב דעיכת המטען מחלקיקים: גזים המכילים חלקיקים מרחפים, אבק או טיפות נוזל עלולים להיטען חשמלית במהלך תנועתם. רמות לחות גבוהות יותר מצפות את החלקיקים בלחות, וכתוצאה מכך המטען החשמלי שנוצר ונצבר דועך בקצב גדול יותר ובכך מקטין את הסיכון לפריקת חשמל סטטי.

תקן 77 NFPA ממליץ לבחון את האפשרות להבטיח לחות יחסית של 50% לפחות באזורים מבוקרים בהם קיימים אדי גזים דליקים.

9. מנגנוני פריקת חשמל סטטי בגזים:

מבחינה פיסיקלית ישנם מספר סוגי פריקות חשמל סטטי בגזים. בפרק זה נדון בפריקות חשמל סטטי העלולות להצית אווירה נפיצה של גזים דליקים. הסוגים השכיחים מפורטים להלן:

9.1. הצתה כתוצאה מנוכחות טיפות נוזל או מוצקים בזרם הגז:

גזים נקיים אינם יכולים לצבור מטען משמעותי של חשמל סטטי. אולם כאשר זרם הגז מכיל מוצקים מרחפים (לדוגמא חלקיקי קורוזיה מתכתית) או טיפות נוזל (כגון: טיפות מים שהתעבו), עלול להצטבר מטען גבוה של חשמל סטטי.

- היווצרות המטען: זרימה דו פאזית המכילה טיפות נוזל או קורוזיה הנטענות כתוצאה מתנועתם בזרם הגז.

- הצטברות המטען: מטען חשמל סטטי יצטבר על גבי טיפות הנוזל או המוצק, ודעיכת המטען תהיה איטית מאוד בגלל הריחוף בזרם הגז.

- פריקת המטען: פריקת מטען כתוצאה מהפרש הפוטנציאליים בין טיפות הנוזל / המוצק הטעונים לבין אלמנטים בתוך הצנרת הנמצאים בפוטנציאל אחר (לדוגמא אביזרי מתכת מוארקים).

בקרות מומלצות:

א. תכנון צנרת הגז באופן שימנע נקודות נמוכות בקווי גז בהם עלולים להצטבר נוזלים (כתוצאה מעיבוי גזים) או חלקיקי קורוזיה.

ב. מניעת היווצרות אווירה נפיצה בקווי גז (ווידוא שהאווירה בציוד היא מעל סף הנפיצות העליון, ה-UEL, או מתחת לסף הנפיצות התחתון, ה-LEL).

9.2. הצתה כתוצאה מחיכוך של מוצק/קרח עם גז דליק:

במקרה של שימוש בגזים מונזלים תחת לחץ (לדוגמא: אתילן, פרופילן וכד'), שחרור הגזים דרך פורק לחץ, ונט או חור עלול לגרום לקפיאת אדי מים בסמוך לנקודת הדליפה ולהיווצרות קרח בסמוך אליה. החיכוך של הגזים הדליקים עם הקרח ו/או זרימה דו פאזית עלולים לגרום להצתה.

- **היווצרות המטען:** זרימה דו פאזית (לדוגמא טיפות נוזל או קורוזיה) הנטענות כתוצאה מתנועתם בזרם הגז.
- **הצטברות המטען:** מטען חשמל סטטי יצטבר על גבי ציוד תהליכי שאינו מוארק (לדוגמא על גבי פורק הלחץ).
- **פריקת המטען:** פריקת המטען שהצטבר כתוצאה מהפרש פוטנציאליים בין שני גופים. לדוגמא: ראה את האירוע בחברת Paraxair בו פריקת פרופילן מפורק לחץ של גליל גרמה לשריפה (Jet fire) ולהתבקעות במנגנון BLEVE של גלילי גז שאוחסנו בסמוך. לפירוט על אירוע זה ראה:

<https://www.csb.gov/praxair-flammable-gas-cylinder-fire/>

בקורות מומלצות:

- ווידוא שפורק הלחץ על גלילי גז אינו מכוון ללחץ העלול להתפתח במצב של עבודה שגרתית (בד"כ פורק הלחץ מכוון ללחץ העבודה המקסימאלי המתוכנן של הגליל - MAWP).
- אחסון גלילי גזים על גבי משטח מוארק כדוגמת משטח בטון (על מנת למנוע הצטברות מטען חשמל סטטי על גוף הגליל). כמו כן, מומלץ לאחסן את גלילי הגזים תחת הצללה.
- הפרדה בעזרת קירות בטון בין גלילי הגזים (על מנת למזער את כמות הגלילים העלולים להיות מעורבים באירוע מעין זה).

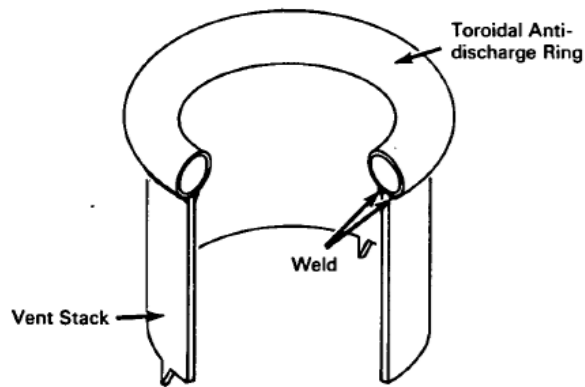
9.3. פריקת קורונה (Corona Discharge):

פריקת קורונה נוצרת כתוצאה מהצטברות מטען חשמלי על גבי קצוות חדים (כמו לדוגמא זיזים/ קצוות חדים שנותרו בקצה הוונט לאחר ריתוך). פריקת הקורונה עלולה להצית בעיקר גזים בעלי אנרגיית הצתה מינימאלית (MIE (Minimum Ignition Energy נמוכה מאוד, כגון מימן ואתילן.

- **היווצרות המטען:** זרימת זרם הגז.
- **הצטברות המטען:** מטען חשמל סטטי יצטבר על גבי קצוות מוליך חדים.
- **פריקת המטען:** השדה החשמלי בקרבת פני השטח של הקצה החד הופך לחזק מאוד עקב ריכוז השדה ברדיוס הגיאומטרי קטן מאוד. חוזק שדה זה עשוי לעלות על סף הפריצה החשמלית (breakdown voltage) של הגז ולגרום לפריקה.

בקורות מומלצות:

- א. בכדי למזער את ההסתברות לפריקת קורונה, מומלץ להתקין בקצה הוונט טבעת (NASA Toroidal ring) שתבטיח שזרם הגז היוצא יראה בקצה הוונט רק פני שטח חלקים ובעלי רדיוס גדול של 3 ס"מ או יותר.



איור מס' 25; טבעת (NASA Toroidal ring) הממזערת את ההסתברות לפריקת קורונה

- ב. מומלץ להתקין בסמוך לוונט גלאי להבה, על מנת שניתן יהיה לזהות להבה במידה והיא תפרוץ מקו הוונט.

10. נספחים:

10.1. נספח א'-מנגנוני הפריקה

פריקות בנוזלים:

מנגנון פריקה	תרחיש	בקורות (הגנות) מומלצות
פריקת ניצוץ (Spark Discharge)	<p>פריקה חשמלית בין שני גופים מוליכים בעלי הפרש פוטנציאלים (מטען חשמלי מנוגד):</p> <p>פריקת ניצוץ בעקבות הצטברות מטען חשמל סטטי על גבי גוף מתכתי שאינו מוארק או מגושר ("מתכת צפה").</p> <p>פריקת ניצוץ עקב זרימה של נוזל מוליך בתוך צנרת מבודדת</p>	<ul style="list-style-type: none"> הארקה או גישור של כל הגופים המוליכים הקיימים במערכת ושמירת <u>רציפות הארקה</u> אחסון של נוזלים מוליכים צריכה להיעשות במכלים מתכתיים (או מכלים העשויים מחומר מוליך) ומוארקים. הזרמה של נוזלים מוליכים צריכה להיעשות רק בצנרת מתכתית (או מוליכה) ומוארקת. בדיקות תקופתיות של ההתנגדות החשמלית של ההארקה.
פריקת מברשת (Brush Discharge)	<p>מתרחשת בין גוף מוליך מוארק לבין פני השטח של נוזל טעון בעל מוליכות נמוכה (כגון דלקים).</p>	<ul style="list-style-type: none"> הימנעות מהכנסת מוליך מוארק (כגון כלי דיגום או מכשיר למדידת מפלס) לפני השטח של נוזל מבודד טעון. כאשר ישנו מכל המכיל נוזל מבודד טעון, יש: למנוע מצב של המצאות גופים מוליכים מוארקים בקרבת פני השטח של הנוזל (כגון מוט דיגום, מד מפלס או מצוף מד גובה מוליך ומוארק). להשתמש בציוד אנטיסטטי. זמן המתנה מספיק לאחר מילוי המכל בכדי לאפשר למטען הצבור על גבי הנוזל

<p>להתפרק (לדוגמא: מקובל להמתין 30 דקות לפחות אחרי מילוי מיכל עם נוזלים מבודדים לפני ביצוע דיגום ממנו).</p> <ul style="list-style-type: none"> • הקטנת מהירות הזרימה של נוזלים מבודדים (רצוי לפחות מ-1 מטר/שניה) בקווים המובילים למיכל. • יש לוודא אווירה אינרטי (במכלים בהם עלולה להיווצר אווירה נפיצה או לחלופין להשתמש במכלים עם גג צף). 		
<ul style="list-style-type: none"> • הימנעות ככל האפשר משימוש באביזרים או ציודים בהן יש שכבה של חומר מבודד הצמודה לשכבה של חומר מוליך. • במקרה בו חייבים להשתמש בשכבה של חומר מבודד הצמודה לשכבה של חומר מוליך (כמו לדוגמא במקרה של צנרת גמישה), יש למזער את ההסתברות לפריקת מברשת מתגלגלת ע"י: <ol style="list-style-type: none"> א. ווידוא שמתח הפריצה של השכבה המבודדת הינו נמוך מ-4 kV ושהשכבה המוליכה מחוברת להארקה או מגושרת. ב. שימוש בשכבה מבודדת בעובי של פחות מ-2 מ"מ או מעל 10 מ"מ. 	<p>כאשר קיים משטח של חומר מבודד הנמצא צמוד או ליד גוף העשוי מחומר מוליך ומוארק, או משטח העשוי שכבה דקה של חומר מבודד (פחות מ-8 מ"מ) שבו צד אחד של המשטח טעון במטען חשמלי חיובי והצד השני טעון במטען חשמלי שלילי, המשטח ישמש כמעין קבל הצובר מטען של חשמל סטטי. כאשר צפיפות המטען הנצטבר עולה מעל $250 \mu\text{C}/\text{m}^2$, תתרחש פריצה של החומר המבודד של המשטח, ותיווצר פריקת מברשת מתגלגלת על שכבת הציפוי של החומר המבודד.</p>	<p>פריקת מברשת מתגלגלת propagating brush (discharge)</p>
<ul style="list-style-type: none"> • שימוש במילוי דרך צינורות המגיעים לכ-30 ס"מ מעל תחתית המיכל 	<p>היווצרות מטען סטטי בעת זרימת הנוזל בנפילה חופשית מהפתח העליון של המיכל, או</p>	<p>Splash Discharge</p>

<ul style="list-style-type: none"> הגבלת קצב המילוי בתחילת התהליך (רצוי למהירות זרימה של פחות מ-1 מטר/שניה) הימנעות מהתזה ישירה של נוזלים למיכל. 	<p>כתוצאה מהתזה לתוך מיכל פתוח.</p>	
<ul style="list-style-type: none"> מניעת המצאות אוירה נפיצה במיכל לפני תחילת מילוי (טיהור האוירה הנפיצה או הכנסת אוירה אינרטיית) הגבלת מהירות הזרימה בתחילת המילוי לפחות מ-1 מטר/שניה. 	<p>העברת דלק בעל מוליכות נמוכה למיכל שהיה בו קודם דלק עם אדים דליקים בעלי לחץ אדים גבוה.</p>	<p>Switch Loading</p>

10.2. נספח ב' - שלבים לביצוע סקר חשמל סטטי:

שלב א' – מיפוי תהליכים / פעילויות בהם נעשה שימוש בנוזלים ו/או גזים דליקים :

- רשימת כל החומרים בהם נעשה שימוש בתהליך
 - עבור כל אחד מהחומרים יש לפרט את הטמפ' המקסימלית בה הוא ימצא בתהליך ואת נקודת ההבזקה שלו. במידה וחומר נמצא בטמפ' הגבוהה מנקודת ההבזקה שלו, הוא ייחשב כחומר דליק.
 - מידע נדרש לצורך ניתוח התרחישים (ראה פירוט לעיל בסעיף 6)
- שלב ב' – זיהוי הציודים בהם קיימת או עלולה להיווצר אווירה נפיצה (הציודים בהם קיימים חומרים הנמצאים בטמפ' הגבוהה מנק' ההבזקה שלהם).
- שלב ג' – זיהוי תרחישים אפשריים לפריקת חשמל סטטי: בחינה עבור כל אחד מהציודים שזוהו בשלב א', האם יכול להתרחש אחד ממנגנוני פריקת החשמל הסטטי שתוארו במדרוך זה.
- שלב ד' – ניתוח הבקורות עבור כל תרחיש: יש לבחון האם הבקורות המומלצות עבור כל תרחיש אכן יושמו בפועל.



10.3. נספח ג' – תקנים רלוונטיים:

10.3.1. מדריך אירופאי (CENELEC) לבטיחות פריקה אלקטרוסטטית בתעשייה:

CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) technical report
CLC/TR 50404: 2003 (June 2003 version E):

Electrostatics -Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity.

תקן זה הוא המסמך המפורט ביותר בעולם בנושא החשמל הסטטטי וסיכוניו
בתהליכים שונים בתעשייה ובסוגי חומרים ומצבי צבירה שונים שלהם.

10.3.2. תקן NFPA 77:

התקן יצא לאור על ידי האיגוד הלאומי למניעת שריפות בארצות הברית (NFPA). תקן זה שימש בסיס לתקנים דומים ברחבי העולם, כולל תקן ישראלי – ת"י 1069. בתקן זה כלולים מרבית הנושאים הרלבנטיים לבדיקות חשמל סטטי: התופעות הפיסיקליות של פריקה אלקטרוסטטית, התופעות הפיסיקליות של פריקה אלקטרוסטטית, אמצעי בקרה כלליים, צמצום הרגישות והפגיעות של חומרים מסוכנים ושל אטמוספירה דליקה / פצצה, אחסנת נוזלים דליקים, גזים דחוסים, אבק וסיבים, תהליכים תעשייתיים ומסחריים היוצרים חשמל סטטי, גלאי מטענים אלקטרוסטטיים ועוד.

11. ביבליוגרפיה

1. IEC 60079-32 (Explosive Atmosphere: Static Electricity).
2. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) technical report CLC/TR 50404: 2003 (June 2003 version E):
Electrostatics -Code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity.
3. NFPA 77 : Recommended Practice on Static Electricity (2000 Edition).
4. המוסד לבטיחות וגיהות/ מהנדס משה נצר, "חשמל סטטי" 2004

עדיין לא חלק מההתאחדות ?

אנו מזמינים אתכם להצטרף להתאחדות התעשיינים בישראל וליהנות מליווי מקצועי, עדכוני רגולציה שוטפים וגישה לפורומים המובילים בתעשייה.

כחברי התאחדות, תוכלו לקחת חלק ב:

- **פורום בטיחות תהליכית:** פלטפורמה ייחודית לשיתוף ידע, למידה מאירועים וקידום פתרונות הנדסיים ותפעוליים לטובת כלל הענף.
- **פורומים וועדות מקצועיות נוספות בתחומים שונים:** השתתפות בזירות מקצועיות לגיבוש עמדות התעשייה מול מקבלי ההחלטות
- **ליווי רגולטורי:** מתן כלים להטמעת דרישות רגולטוריות מורכבות, וייצוג האינטרסים של התעשייה מול הרשויות
- **הכשרות וימי עיון:** גישה למדריכים מקצועיים, וובינרים, ימי עיון וקורסים המותאמים לצורכי התעשייה.

פרטים ליצירת קשר

[/https://industry.org.il](https://industry.org.il)

איגוד הכימיה, פרמצבטיקה ואיכות הסביבה – התאחדות התעשיינים בישראל

