

## פרק שביעי

# סיכוני פריקה אלקטרוסטטית במיגזרים נוספים

עד כה עסקנו במרבית התעשיות ומיגזרי התעשייה העוסקים בחומרים הרגישים לסיכוני החשמל הסטטי. לא נכללו מספר מיגזרים תעשייתיים שבהם הסיכון מפריקה אלקטרוסטטית נמוך יחסית, או שניתן ללמוד על פתרונות ישימים עבורן מהשוואה לתעשיות דומות, שנכללו בחוברת. להלן מספר מיגזרים נוספים שלא נכללו בחוברת, עם התיחסות לפרקים המתאימים בחוברת.

### תעשיית הפלסטיק:

**הסיכונים:** הצתת אדי ממיסים ואדי מחמצנים. נושא זה מפורט בפרקים 2 ו-4 (כימיה ודלק).

### מטוויות:

**הסיכונים:** הצתה או פיצוץ בעקבות הצתה של סיבי כותנה או צמר המרחפים בתוך אולמות הייצור. נושא זה מקביל לסכנות של התפתחות אווירה נפיצה עקב אבק אורגני וחקלאי - ראו פרקים 2 ו-3 (כימיה ומכוני תערוכות).

### בתי חולים

**הסיכונים:** חשמול בטיפול חודרני; הנשמת מטופלים באמצעות חמצן; רגישות של מיכשור רפואי אלקטרוני לפריקה אלקטרוסטטית; חומרי הרדמה בניתוחים. נושא חומרי ההרדמה על בסיס אתר היווה בעבר בעיה עיקרית בחדרי ניתוח, עקב דליקותו ונדיפותו של האתר. הבטיחות בחדרי הניתוח השתפרה מאד הודות לפיתוח חומרי הרדמה אדישים, בלתי דליקים. עדיין מושקע מאמץ רב במניעת רגישות של ציוד אלקטרוני רפואי לפריקה אלקטרוסטטית, מאדם או מרהיטים. מיכשור אלקטרוני רפואי, אשר יגיב באופן בלתי צפוי להפרעה חשמלית הנגרמת עקב פריקה אלקטרוסטטית, עלול לגרום לפגיעה חמורה בחולה.

בעבר נחקרו רגישויות של מערכות אלקטרוניות שונות לפריקה אלקטרוסטטית, כגון מערכת החייאה בדום לב באמצעות הלם חשמלי; מערכת בקרת טמפרטורה של אינקובטור לפגים; מערכת ניטור נשימה של תינוקות; מערכת לטומוגרופיה ממוחשבת (CT) ועוד.

### תעשיית מתוחכמות

בתעשיות מתוחכמות, באלקטרוניקה ובייצור מיקרו-אלקטרוניקה, נעשה שימוש נרחב בכימיקלים נדיפים ודליקים, חמצן ודלק. המקבילה המתאימה לתעשיות אלה נמצאת בפרקים 2 ו-4 (כימיה ודלק).

תעשיית האלקטרוניקה נפגעת מאד מנזקים לרכיבים אלקטרוניים רגישים לפא"ס. זו אינה בעיה של בטיחות במקום העבודה, אלא בעיקר איום על איכות המוצר. בנושא זה יצאו לאור ספרים, מאמרים ותקנים רבים. התעשייה המתוחכמת משקיעה מיליוני דולרים ברכישת אמצעים לפיקוח על מיטענים סטטיים באולמות הפיתוח והייצור, ובהדרכת העובדים לשימוש באמצעי הארקה אישיים, ובאמצעים מפעליים לפיקוח על מיטענים סטטיים. כדי לקבל תו תקן איכות, ISO-9000, יש להוכיח, כיום, שהמפעל מאורגן כדי למנוע נזקים לרכיבים עקב פריקה אלקטרוסטטית.

## פרק שמיני תקנים ומידע

### מדריך אירופה (CENELEC) לבטיחות פריקה אלקטרוסטטית בתעשייה

CENELEC Report R044-001: Safety of machinery - Guidance and Recommendations for the Avoidance of Hazards due to Static Electricity, January 1998

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

המסמך כולל 10 פרקים ו-4 נספחים:

פרקים 1-3: תכולה, הגדרות ומבוא כללי;

פרק 4: חשמל סטטי במוצקים שאינם מוליכים חשמל;

פרק 5: חשמל סטטי בנוזלים;

פרק 6: חשמל סטטי בגזים;

פרק 7: חשמל סטטי באבקות;

פרק 8: חשמל סטטי על בני אדם;

פרק 9: חבטה (הלם) כתוצאה מהתחשמלות;

פרק 10: גישור והארקה;

נספח A: יסודות החשמל הסטטי;

נספח B: פריקת חשמל סטטי בתרחישים מיוחדים;

נספח C: קביעת הדליקות ותכונות ההצתה של חומרים מסוכנים;

נספח D: סיווג של אזורי סיכון (שיש בהם אווירה דליקה);

מקורות.

המסמך החשוב הזה מהווה, מאז פרסומו (בשנת 1998), ציון דרך חשוב בהצגת הידע האנושי הכולל. לגבי סיכוני חשמל סטטי בעבודה עם חומרים רגישים לחשמל סטטי, והאמצעים הנדרשים להגנה בפני גורם הצתה זה - על-ידי סילוקן או ניטרולו.

### תקן NFPA-77

התקן יצא לאור על-ידי האיגוד הלאומי למניעת שריפות בארצות הברית (NFPA) בשנת 1977 ועודכן בשנת 1988. תקן זה שימש בסיס לתקנים דומים ברחבי העולם, כולל תקן ישראלי - ת"י 1069. בתקן כלולים מרבית הנושאים הרלוונטיים לבטיחות פריקה אלקטרוסטטית: התופעות הפיזיקליות של פא"ס; אמצעי בקרה כלליים; צמצום הרגישות והפגיעות של חומרים מסוכנים ושל אטמוספירה דליקה/פציעה; אחסנת נוזלים דליקים; גזים דחוסים; אבק וסיבים; תהליכים תעשייתיים ומסחריים היוצרים חשמל סטטי; גלאי מיטענים אלקטרוסטטיים ועוד.

## תקן ישראלי 1069 [1980]

התקן מכיל מידע רב-ערך. יש בו 4 פרקים ו-6 נספחים:  
פרק א': פרק כללי, כולל הגדרות, ותאור פיזיקלי של התהוות מיטענים סטטיים ופריקתם;  
פרק ב': שיטות פיקוח עיקריות, כולל התייחסות לגופים מוצקים, נוזלים, גזים, אבק ובני אדם.  
פרק ג': שיטות מדידה, כולל גילוי מתח אלקטרוסטטי, מדידת פוטנציאל אלקטרוסטטי ושדה אלקטרוסטטי, מדידת מיטענים, התנגדות חשמלית של גופים מוצקים ונוזלים.  
פרק ד': מניעת הסיכון הכרוך בפריקה אלקטרוסטטית או צמצומו, ברצועות הינע וסרטי מסוע, בחומרי נפץ והדף, הדפסה, ציפוי, מריחה והספגה, ניקוי יבש ומוצרי נפט.  
נספח א': חומרים דליקים.  
נספח ב': שיעור אנרגיית ההצתה של חומרים שונים.  
נספח ג': ציפויים מוליכים לרצועות הינע ולסרטי מסוע.  
נספח ד': דוגמאות לפתרון בעיות מעשיות הכרוכות בפריקה אלקטרוסטטית.  
נספח ה': קביעת ההתנגדות החשמלית הממוצעת של רצפה.  
נספח ו': קביעת ההתנגדות החשמלית של זרנוקים ושל שרוולי ריפוד לקדחים.

## חשמל סטטי: כללי בטיחות במפעל

[Static Electricity: Rules for Plant Safety]

חוברת שיצאה לאור בינואר 1988 על-ידי ועדת מומחים של תעשיות הכימיה בשוויץ. החוברת כוללת מידע תיאורטי ומעשי רב-ערך, כולל איורים רבים וטבלאות נתונים על התכונות החשמליות של חומרים כימיים. החוברת מטפלת בשיטתיות בכל מצבי הצבירה של חומרים: מוצקים, נוזלים, גזים ואירוסולים. בכל פרק מוצגות בעיות אופייניות של היווצרות מיטענים סטטיים ומנגנוני פריקה אלקטרוסטטיים אשר עלולים לחולל הצתה. בהמשך, מוצגות שיטות הפיקוח על פריקה אלקטרוסטטית, הישימות לתרחישים המוצגים בתחילת כל פרק. החוברת חשובה מאד להבנת סכנות הפריקה האלקטרוסטטית במיגזרי תעשייה שונים מלבד התעשייה הכימית. החוברת מציגה מיגוון פתרונות ישימים, לתרחישים שונים של היווצרות מיטענים סטטיים ופריקתם דרך חומרים מסוכנים.

## תיאור תאונות כתוצאה מפריקה אלקטרוסטטית

### פיצוץ במכון תערוכת

פריקה אלקטרוסטטית גרמה לפיצוץ אבק חקלאי (אבק אורגני שנוצר מגרעינים) בתוך חלל פנימי של נפה גדולה. האש התפשטה לאורך הצנרת מהנפה אל מערכת של ממגורות מספוא (סילו) בגובה 27 מ'. האבק המרחף בתוך הממגורות התפוצץ ושתי הקומות העליונות של המבנה קרסו. עובד שעמד באותה שעה על גג הממגורה נפל ונהרג. עובד שני נכווה מהאש שפרצה מתוך הנפה.

### התלקחות אדים בעת מילוי דלק בארגז הרכב

לקוח מילא מיכל דלק מתכתי קטן (ג'ריקן) שהוצב על רצפת טנדר. רצפת המתכת היתה מכוסה ביריעת פלסטיק. בעת מילוי המיכל ניצתו לפתע אדי הדלק והאיש נשרף למוות. בחקירת האירוע התברר שמיכל הדלק הקטן צבר מיטען סטטי במהלך זרימת הדלק לתוכו. בשלב כלשהו נפרקה אנרגיה אלקטרוסטטית מהמיכל אל גוף המתדלק או אל פיית צינור הדלק, דרך אדי הבנזין. אילו הוצב המיכל על גבי מיטטח מוליך - המיטען הסטטי היה נפרק, תוך כדי הטעינה. זה לא היה האירוע הראשון מסוגו. חברת המכוניות "פורד" וחברת "Standard Oil" בארצות-הברית, הפיקו כל אחת, כללי זהירות בנושא. שתי החברות ממליצות להימנע לחלוטין מתדלוק מיכלים המוצבים על גבי מיטטחים מבודדים בכלי הרכב. יש להציב את המיכל על אספלט או על אדמה, ורק אז למלאו בדלק.

### פריקה אלקטרוסטטית בעקבות ניעור אבקה

עובדת עסקה בשקילת מנות חומר פירוטכני, הרגיש להצתה על-ידי חשמל סטטי. היא העבירה אבקה מתכתית פירוטכנית ממיכל זכוכית אל מאזני שקילה אלקטרוניים. העובדת הצליחה למזוג כחצי מהכמות הדרושה. שאר החומר נצמד אל מיכל הזכוכית ולכן העובדת ניערה את מיכל החומר במרץ רב. כתוצאה מחיכוך החומר בזכוכית נוצר בו מיטען סטטי. העובדת שפכה את החומר הטעון על החומר הבלתי טעון, שכבר היה על המאזניים. נוצרה פריקה אלקטרוסטטית בין שתי מנות החומר, דרך תערוכת האבקה עם האוויר. החומר הוצת, מיכל הזכוכית התפוצץ והעובדת נפצעה קשה. עובדת נוספת נפצעה קל מרסיסי הזכוכית.

### פיצוץ מצבר

עובד עסק בטעינה מהירה של מצברים חשמליים. כאשר טעינת המצברים כמעט והסתיימה, ניגש העובד לפרק את קוטבי המצבר מבלי המטען החשמלי. ואז התרחשה פריקה אלקטרוסטטית מאצבע העובד אל קוטב המצבר, דרך המימן שנפלט מפתחי המצבר בעת הטעינה, שגרמה לפיצוץ המימן המעורב באוויר. הפיצוץ החיצוני חדר לתוך בית המצבר, גרם להרס מבנה המצבר ולהתזת האלקטרוליט. העובד נפצע באורח בינוני מהחומצה (האלקטרוליט) ומחלקי דופן המצבר שהועפו לכל עבר.

## **פריקה אלקטרוסטית מגרגרי פלסטיק דרך אדים דליקים**

מפעל המייצר צינורות פוליאתילן משתמש כחומר גלם בגרגרי פוליאתילן מעורבים במחמצן נוזלי מסוג פראוקסיד. בזמן הובלתם ושפיכתם נטענים גרגרי הפוליאתילן במיטען אלקטרוסטטי. הפראוקסיד הוא נוזל נדיף ודליק מאוד. פריקה אלקטרוסטטית מהפוליאתילן הטעון אל דופן מיכל המתכת, דרך אדי הפראוקסיד המרחפים במיכל, גרמה לפיצוץ האדים. גג המיכל הועף ממקומו, נתז של גרגרי פוליאתילן בוערים נפלט החוצה וגרם לשריפה אשר פגעה במכונות, במיתקני ייצור ובארון חשמל ראשי. למרבה המזל, העובד לא היה במקום ולא נפגע. המפעל הושבת למספר חודשים ונגרם לו נזק כלכלי כבד.

## **פריקה אלקטרוסטית בין צינור טעון בלתי מוארק לגוף מוארק - במפעל כימיה**

עובד שאב אבקה אורגנית מבודדת חשמלית. האבקה היתה טעונה במיטענים סטטיים מתהליכי ייצור קודמים. צינור השאיבה היה מפלסטיק וקצה הצינור ממתכת. הקצה המתכתי לא היה מוארק. חלקיקי אבקה טעונים אלקטרוסטטית, שעברו דרך קצה הצינור המתכתי ה"צף", גרמו לו להיטען אט-אט - עד שהצטברה בו אנרגיה מספקת להצתת האבקה המעורבת באוויר. בשלב כלשהו, העובד התקרב עם קצה הצינור אל גוף מתכתי מוארק. מהצינור הטעון פרץ ניצוץ אל הגוף המוארק, דרך האוויר שהכיל אבקה אורגנית מרחפת. התוצאה היתה שריפה מהירה של התערובת, על גבול הפיצוץ. למרבה המזל, איש לא נפגע וגם ציוד הייצור בחדר לא ניזוק.

## **תקרית הצתה של אדי אתיל-אצטט בעת פריקת צנטריפוגה**

חומר המכיל אתיל-אצטט עבר תהליך של ייבוש חלקי בצנטריפוגה. החומר יוצא מהתהליך כשהוא נראה כבצק, ומכיל עדיין חלק מהממיסים. בעת פריקת החומר מהמכונה, לתוך שק פוליאתילן, התלקחו האדים בחלל החדר בו עמדה המכונה וגרמו לפציעה קלה של עובד שהיה בחדר. תחום הדליקות של הממיס 11.5%-2.2% והעובדה שהוא כבד מהאוויר, מגבירה את ההסתברות לאירוע הצתה עקב פא"ס מהשק הטעון במיטען אלקטרוסטטי, כאשר אדי הממיסים מתערבבים באוויר הפנוי שבשק תוך מילוי בחומר הבצקי. אין נתונים לגבי אנרגיית ההצתה של האדים, אולם מתוך טמפרטורת ההבזקה הנמוכה ( $-4^{\circ}\text{C}$ ) ניתן להסיק שאנרגיית הצתת האדים תהיה בתת-קבוצה B לפי הגדרות IEC, יחד עם ממיסים רגישים להצתה אחרים, כמו אלכוהול (אנרגיית הצתה מזערית: 0.65 mJ), אצטון, טולואן וכיו"ב.

הלחות היחסית במיתקן לא היתה מבוקרת על ידי אמצעי הלחה, ולכן ניתן להניח, הנחה שמרנית, שהלחות היחסית בסביבת הצנטריפוגה היתה כנראה נמוכה. יש להניח שהלחות ביום האירוע היתה נמוכה מהרגיל, מה שמסביר את התפרצות הדליקה אשר כמותה לא התרחשה קודם במיתקן הזה.

רצפת החדר של המיתקן מצופה בחומר אפוקסי יצוק מבודד. לא ידוע אם הרצפה הורטבה לפני תחילת הפריקה של החומר. הרטבת הרצפה היתה מגבירה את הלחות בחדר ומונעת מהאדם להיטען במיטען סטטי.

## **אירוע דליקה במסוף חלוקה של טולואן (Toluol)**

בחודש מרץ, שבו הלחות היחסית נמוכה, בדרך כלל, אירוע שתי הצתות של אדי טולואן במסוף חלוקה של כימיקלים. הצתות אירעו בשני ימים עוקבים, בעת מילוי משאיות מיכל בטולואן. המשותף לשני המקרים הוא שהצתת האדים אירעה בעת פתיחת מנגנון פירוק מהיר של צנרת 2", לצורך העברת טובלן מעמדת חלוקה אחת לעמדת חלוקה שניה. בשני המקרים - האש כובתה במהירות ולא היו נפגעים. הנהג והמפעיל (במקרה השני) תוחקרו (על ידי המחבר ומסרו את פרטי האירוע על פי זכרונם.

נראה שהאירוע נגרם עקב פריקה אלקטרוסטטית דרך אדי טולואן, הידועים כרגישים מאוד להצתה בהשפעת כל מקור אשר מסוגל להפיק אנרגיה גבוהה מ-0.2mJ.

מנגנון הכשל מאפשר את היווצרות הניצוץ הא"ס. האירועים שהוזכרו קודם התרחשו לאחר שמנגנון הפירוק הקודם הוחלף במנגנון פירוק "מהיר". במנגנון הישן נדרשה הברגה של הטובלן במופָה של עמוד הצינור הקבוע, שניהם בקוטר "2". מניתוח ההבדלים בין שני סוגי החיבורים של הצנרות עולה שמנגנון הפירוק המהיר הוא בעייתי במיוחד.

הטובלן הושאר בעת ביצוע הניתוק במיכלית, כשהוא טבול בתוך הטולואן. חדירת אוויר אל קטע הצינור הטבול של הטובלן איפשר גלישה של הטולואן (המוחזק בתוך הצינור הודות לתת-לחץ), אל תוך המיכלית.



איור 56: סימולציה של פריקת הבזק, בעת פירוק שני חלקי מנגנון לפירוק מהיר

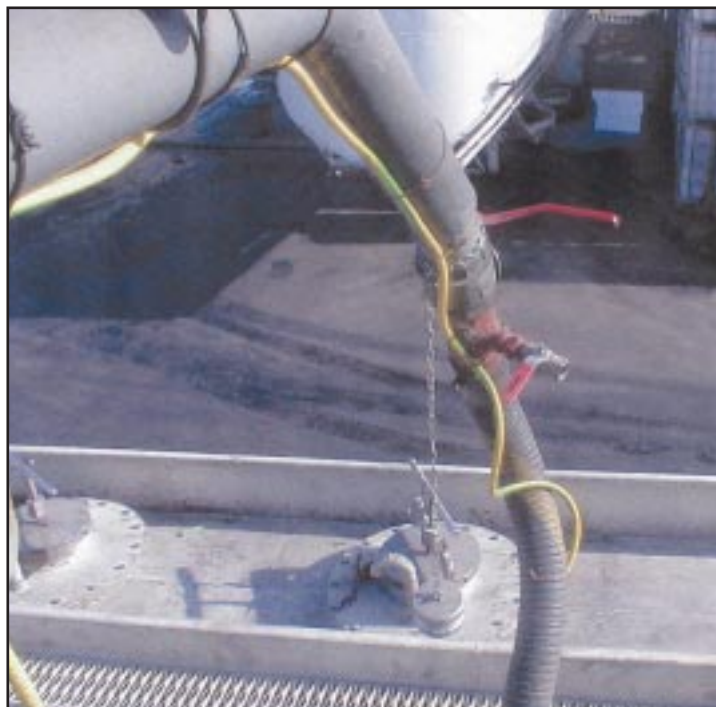
ניתן לקבוע שקיימת סבירות רבה לאירוע הצתה של טולואן עקב פא"ס, דרך תווך המכיל טולואן ואוויר כפי שאירע סמוך מאוד לפתיחת המנגנון לפירוק מהיר של הטובלן. תערובת טולואן עם אוויר - בתחום הדליקות של האדים התאפשרה בעיקר עקב חדירת מנת אוויר גדושה בעת פתיחת שני החלקים. רגישות ההצתה של אדי טולואן עם אוויר גבוהה מאוד, ולכן יש למנוע כל אפשרות של היווצרות מקור הצתה. מניעת היווצרות תערובת דליקה של אדים איננה אפשרית בעת מילוי המיכלית, אולם ניתן למנוע את מקור ההצתה - כפי שאכן מעידות הפעולות המתקנות אשר בוצעו במיתקן ואשר מפורטות בהמשך.

אחת השאלות העולות ממימצאי התחקיר היא: איך לא אירעה הצתה בזמן שבו היה קיים מנגנון הפירוק הקודם, שהתבסס על פתיחת תבריג. מבחינת מנגנון הכשל, גם בנייתוק טובלן המחובר על ידי תבריג תיתכן הצתה א"ס. אולם, כנראה שהזמן הממושך העובר בין חדירת האוויר לצינור לבין סיום הפרדת שני חלקי הצינור במנגנון עם ההברגה, גורם לכך שריכוז תערובת הטולואן באוויר יהיה גבוה מגבול ההצתה העליון.

בנוסף, במקרה של פירוק על ידי תבריג - הנתק בין שני חלקי הצינור הוא מיידי שלא כמו במנגנון הפירוק המהיר, בו קיימים מספר ניתוקים קצרים גם לפני ההפרדה הסופית בין שני חלקי הצינור (ניתוקם האחד מהשני). נתק מיידי מגדיל את מירווח הפריצה בין שני חלקי הצינור, והמיטען הנבנה באותו רגע על הטובלן אינו מספיק גבוה כדי לפרוץ את תווד האוויר.

**מניעת מקור ההצתה:** עקב הסבירות הגבוהה לאירוע הצתה עקב פא"ס בעת ניתוק הטובלן מהארקה, נראה שיש למנוע את פירוק הטובלן מעמוד המילוי. הפתרון לסילוק שאריות הטולואן, הכלואות בטובלן בגמר המילוי, הוא הוספת מגוף בקצה העליון של צינור הטובלן, המאפשר חדירת אוויר אל תוך הטובלן מבלי לבצע ניתוק פיזי בין חלקי הצנרת (ראו תמונה 57).

ניתן למנוע טעינה א"ס של הצנרת באמצעות הארקה קבועה. אל הקצה העליון של הטובלן מחברים מוליך הארקה, כך שמתקיים התנאי ההכרחי לסילוק נשאן המיטען. למרות שהטולואן טעון גם במצב זה במיטען סטטי משמעותי - מעבר המיטענים לגופים מוליכים יהיה אל גופים מוארקים (הטובלן וגוף המיכלית). תמונה 57 מציגה את התקן הטובלן לאחר חיבורו להארקה.



איור 57: הארקה הטובלן דרך מיקטע צינור גמיש (מחובר גלוונית לטובלן דרך פתיל ספירלי)



# מקורות

**הערה:** הרשימה כוללת מקורות בעברית.  
מקורות בשפות אחרות ניתן למצוא במרכז המידע של המוסד לבטיחות ולגיהות.  
הגנה בפני ברקים, אלביט, אורל, י. אינג', 1986, חיפה.

## המוסד לבטיחות ולגיהות:

סיכוני חשמל סטטי וסילוקם (בטאון בטיחות 117).  
טכנולוגיה חדשה לסילוק חשמל סטטי (בטאון בטיחות 142).  
מיטעני חשמל סטטי וטיפול בנוזלים (בטאון בטיחות 163).  
סיכוני חשמל סטטי (בטאון בטיחות 167).  
מניעת סכנות התלקחות מחשמל סטטי (בטאון בטיחות 181).  
עקרונות פיקוח על פריקה אלקטרוסטטית (פא"ס) להשגת בטיחות בתעשייה (בטאון בטיחות 236).  
סקר מפעלי תעשייה ומוסדות בנושא בטיחות פריקה אלקטרוסטטית (פא"ס) (בטאון בטיחות 241).

## מרכז מידע:

הוראות הבטיחות לחשמל סטטי (1990).  
שיטות למניעת סיכוני חשמל סטטי (1990).  
עובי סוליה לטיפול בחשמל סטטי (1991).  
מצב ועדת התקינה בארץ בנושא חשמל סטטי (פברואר 1991).  
מצב התקנים בארץ בנושא בגדי מגן אנטיסטטיים (מרץ 1991).  
הוראות לטיפול בפריקת מיטענים סטטיים בטעינה ובפריקת דלקים (אוקטובר 1991).  
משמעות ערבוב דלקים בהקשר לחשמל סטטי (אוקטובר 1991).  
הסיכונים להיווצרות חשמל סטטי מהעברת חומר בתפוזות במיכלים בתנועה (אוקטובר 1991).  
קשר בין חשמל סטטי ובעיות בריאות (אפריל 1992).  
איתור תעשיות שיש בהן שימוש בצידוד מגן אנטיסטטי (אפריל 1992).

## מכון התקנים הישראלי:

תקן ישראלי: ת"י 1069, מטעני חשמל סטטי: אמצעי פיקוח ובקרה (1980).  
תקן ישראלי: ת"י 7311, מערכות הגנה מפני פגיעות ברק (1982).  
תקן ישראלי: ת"י 1182, מנעלי בטיחות: מנעלי גומי אנטיסטטי מבוטנים.

## נצר משה, מהנדס:

סקר מפעלי תעשייה ומוסדות בנושא בטיחות פריקה אלקטרוסטטית (פא"ס), המוסד לביטוח לאומי, הקרן למימון פעולות בטיחות בעבודה (1994).  
סקר ספרות: סיכוני פריקה אלקטרוסטטית בתעשייה, המוסד לביטוח לאומי, הקרן למימון פעולות בטיחות בעבודה (1995).  
עקרונות פיקוח על פריקה אלקטרוסטטית (פא"ס) להשגת בטיחות בתעשייה.  
(בטאון בטיחות 236, 1995).  
סקר מפעלי תעשייה ומוסדות בנושא בטיחות פריקה אלקטרוסטטית (פא"ס),  
(בטאון בטיחות 241, 1996).  
שיקולים בתכנון מיתקני חשמל באתרים רפואיים, אינג' כהן א' (ירחון התקע המצדיע 49, 1991).  
הארקות ויעודן, אינג' פלג נ. (ירחון התקע המצדיע 45, 1990).  
שקיות אנטיסטטיות (פולימרים ופלסטיקה בישראל, 1991).  
אריזות אנטיסטטיות (פולימרים ופלסטיקה בישראל, נובמבר 1991).  
הוראת בטיחות: הארקה אלקטרוסטטית (רפא"ל, בלמ"ס, 1993).  
הוראת בטיחות: מימוש ובדיקת הארקות אלקטרוסטטיות, הארקות חשמל, ומגשרים במתקני ייצור הכוללים כימיקלים דליקים (רפא"ל, בלמ"ס, 1997).  
עקרונות הבטיחות והגיהות בעבודה. אינג' שבת, צ. (1985).



## נספח

# סיווג אזורים בהתאם לסיכון היווצרות אווירה נפיצה

קיימות הגדרות לאזורי סיכון לפי התקן הארופי (IEC) ולפי התקן של ארצות-הברית (NEC). בנספח זה מוצגת, בקצרה, השוואה בין שני התקנים והגדרות לציוד מוגן פיצוץ.

**בעיית הבטיחות העיקרית:**  
הצתת תערובת של אוויר באבקות, אדי כימיקלים נדיפים או גזים דליקים.

## הגדרות של אזורי סיכון לפי IEC

**אזורי סיכון:** אזורים אשר יכולים להכיל אטמוספירה נפיצה, עקב תנאים מקומיים או תיפעוליים. אזורי סיכון פוטנציאליים מסווגים לפי ההסתברות להיווצרות אווירה נפיצה (המכילה אבק/אדים/גז/סיבים באוויר).

**אטמוספירה נפיצה/דליקה:** אטמוספירה תהיה נפיצה או דליקה עקב היווצרות תערובת של אוויר וחומרים דליקים - אדים, גז, אבק או סיבים.  
דליקה - בעירה איטית של החומר במהירות התפשטות נמוכה ממהירות הקול.  
פיצוץ - דליקה במהירות על-קולית מלווה בגלי הלם.

- Group I** - התקני חשמל המיועדים לפעול בתוך מיכרה.
  - Group II** - התקני חשמל המיועדים לפעול באזור סיכון, פרט למיכרות.
  - Zone 0** - אזור שנוכחים בו דרך קבע או לזמן ממושך מאוד, גזים או אדים דליקים בדרך-כלל בתוך ריאקטור, מינדף וכיו"ב.
  - Zone 1** - אזור שתיתכן בו הימצאות שכיחה, אך לא תמידית, של גזים או אדים דליקים. בדרך-כלל: אזור המקיף Zone 0; אזורי טעינה ופריקה; הימצאות כלים ואביזרים שבירים; דליפות ממשאבות וצנרת.
  - Zone 2** - אזור שנוכחים בו, לעתים נדירות או לזמן קצר מאוד, גזים או אדים דליקים. בדרך-כלל אזור המקיף Zone 1.
- הערה: אזור שמשוגעים בו נוזלים מסוכנים באמצעות צנרת מרותכת או מולחמת ייחשב בטוח.
- Zone 10** - אזור שנוכח בו, דרך קבע או לזמן ממושך מאוד, אבק דליק. בדרך-כלל בתוך מטחנה, מערבול, מסוע, סילו וכיו"ב.
  - Zone 11** - אזור שבו ניעור תכוף של אבק ניח עלול ליצור אווירה נפיצה לזמן קצר. אזור זה אופייני לסביבה שקיימת בה דליפה ממערכות המכילות אבק דליק, לדוגמה: ניעור מסננים ונפות בטחנות קמח.

## סיווג אזורי סכנה לפי NEC, Article 500

(NEC - NATIONAL ELECTRICAL CODE)

### Class I, Division 1

- א) בתנאי עבודה רגילים עשויים להימצא באוויר גזים ואדים דליקים/נפיצים בכמות המספיקה כדי לגרום דליקה או פיצוץ;
- ב) הימצאות של גזים ואדים אפשרית תמיד, עקב דליפה או בעת ביצוע פעולות תחזוקה;
- ג) שבר בציוד או כשל בתפעול עלולים לגרום דליפת אדים וגזים. במקביל עלול להיגרם כשל של מערכות החשמל.

### **Class I, Division 2**

- א) גזים ואדים דליקים מעובדים ומטופלים במיכל אטום במערכת סגורה. דליפה תתאפשר רק עקב קריסה של המיכל האטום;
- ב) גזים ואדים באוויר מטופלים באמצעות מערכת איוורור ו/או טיהור. הימצאות ריכוז דליק של גז או אדים נגרמת רק בעקבות כשל של מערכות האיוורור/הטיהור;
- ג) אזור ב', בקרבת Class I, Division 1. כאשר תיתכן התפשטות גזים או אדים מאזור "מזהם" לאזור ב', אלא אם ההתפשטות לאזור ב' נמנעת על-ידי אספקת אוויר נקי.

### **Class II, Division 1**

- א) בתנאי עבודה רגילים יכול להימצא אבק דליק/נפיץ באוויר, בכמות המספיקה לגרימת דליקה או פיצוץ;
- ב) הימצאות אבק דליק באוויר תיתכן לעתים קרובות עקב דליפה או שבר בציוד או כשל בתפעול, כשבמקביל עלול להיגרם כשל של מערכות החשמל או מקור הצתה אחר;
- ג) תיתכן הימצאות כמות מסוכנת של אבקות מוליכות באוויר (אלומיניום, מגנזיום וכד').

### **Class II, Division 2**

- א) נוכחות אבק דליק, אשר במצב רגיל אינו נמצא בריכוז מסוכן באוויר;
- ב) הצטברות אבק על גבי אביזרי חשמל לא מפריעה לפעולה הרגילה של האביזר ולא תגרום לחימומו;
- ג) הימצאות אבק דליק באוויר תתאפשר, רק לעתים נדירות, עקב דליפה או שבר בציוד או כשל בתפעול המערכות. במקביל, כשל מערכת חשמלית עלול להוות מקור הצתה, או ייתכן קיום מקור הצתה אחר כלשהו.

## מילון מונחים

- אידוש (To inert)** - הכנסת חנקן או גז אציל לתוך המערכת, כדי להפוך את האווירה שלה לבלתי דליקה.
- בקרת מיטענים אלקטרוסטטיים** - מיכלול האמצעים הדרושים למניעת תאונות ונזקים מפריקה אלקטרוסטטית.
- גג צף** - מצוף מעל פני הנוזל, המכסה את הנוזל ועולה עם עליית מיפלס הנוזל.
- גוף חם** - גוף המכיל חנ"מ או חומר הדף (חנ"ה), או חומר פירוטכני.
- זרם זליגה** - זרם "בורח" לנתיב לא מתוכנן.
- זמן דעיכה** - הזמן העובר עד לפיזור המיטענים האלקטרוסטטיים בחומר מבודד.
- חוזק דיאלקטרי** - יכולת של חומר מבודד לעמוד בפני מתח גבוה.
- חומר נפץ ראשוני** - חומר נפיץ אשר יופעל/ייוץם באנרגיה של 20 מילי-ג'אול או פחות.
- חומר נפץ שניוני** - חומר נפיץ אדיש אשר לצורך ייזומו נדרשת אנרגיה גבוהה מ-40 מילי-ג'אול.
- טובלן (Deep pipe)** - צינור מילוי, המוכנס עד לתחתית המיכל.
- יוזם חשמלי** - רכיב פירוטכני המופעל במתח ו/או בזרם חשמלי (משמש כנפץ, מדליק מנוע רקטי, גז גנרטור, כדור פירוטכני, תחמושת תותחים חשמלית, מפסק פירוטכני ועוד).
- יון** - מולקולה טעונה.
- מיינני אוויר (יוניזטורים)** - מיתקנים המייננים את האווירה.
- מגשר (Bonding)** - פתיל מוליך, המשמש להשוואת פוטנציאלים חשמליים.
- מנגנון הכשל של פריקה אלקטרוסטטית** - צירוף האירועים, הנסיבות והתנאים הגורמים להצתת חומרים מסוכנים על-ידי פריקה אלקטרוסטטית.
- מסנן מיקרוני** - מסנן, בעל חריצים קטנים מ-10 מיקרון.
- מערך עבודה** - צירוף כל הגורמים המעורבים ישירות בתהליך הייצור: עמדת העבודה, העובד, החומרים, הכלים וכל הקשור בהם.
- מעריך שווה פוטנציאל מוארק** - כל הפריטים של מערך העבודה מגושרים ביניהם ומגושרים להארקת הגנה של המבנה.
- מתיינן** - מתמלא ביונים (מולקולות של גז או נוזל, הנושאות איתן מיטען חשמלי).
- נקודת הבזק של אדי נוזל** - הטמפרטורה הנמוכה ביותר של הנוזל, בה נוצרים אדים דליקים.
- נשאן (Carrier) של מיטען אלקטרוסטטי** - גוף המוליך חשמל, בעל קיבול חשמלי עצמי משמעותי (10pF ויותר); או מבודד שאינו מוצק (נוזל, אבק, גרגרים, תרסיס, גז וכיו"ב).
- "צף" (חשמלי)** - גוף או אביזר בלתי מוארק.
- קולטן (Receptor) של מיטען אלקטרוסטטי** - גוף מוליך מוארק או גוף מוליך בעל קיבול עצמי משמעותי (גם אם אינו מוארק) הבא (או עשוי לבוא) במגע עם גוף, נוזל או גז טעון. כל גוף מתכתי מוארק יכול לשמש קולטן.
- תרסיס (אירוסול)** - זרם של טיפות נוזל קטנטנות, מעורבות באוויר או בגז, המותז לתוך החלל.