

# ניתוח וחישוב תנאי הצתת חשמל סטטי

## בהזרמת נוזלים דליקים ומילוי מכלי אחסון

איל צדוק\*, מהנדס מוסמך לבקרת חשמל סטטי

נוזלים דליקים נמצאים בשימוש יומיומי הן במגזר הפרטי והן במפעלי תעשייה, החל מכמות קטנה של בקבוקון בנפח של 50 cc ועד לכמויות עצומות של מאות אלפי ליטרים במפעלים ובמתקני אחסנה. האפשרות להתלקחות קיימת ללא תלות בכמות הנוזל, אך לאופן הטיפול בנוזל יש השפעה מכרעת על הסיכון להתלקחות.

במאמר זה יוצג הסיכון להתלקחות נוזלים דליקים המטופלים במפעלי תעשייה, בהתמקדות על מאפייני התלקחות עקב חשמל סטטי, אשר קיימים בתהליכי הזרמה בצנרת ובמילוי של מכלי אחסון. ניתוח פיסיקלי של תהליכים אלו וחישוב מתמטי-כמותי של מאפייני הסיכון, מאפשר להגדיר ערכים קריטיים של תנאי ההצתה לצורך תכנון של מתקנים וציוד עם הזרמה בטוחה בתנאים מבוקרים.

### מאפייני הצתת חשמל סטטי

צלעות המשולש שלהלן מציגות את שלושת המאפיינים הראשיים, אשר קיומם באותו המקום ובאותו הזמן, הינו הגורם להתרחשות הצתת חשמל סטטי. בתמונה, שריפת ענק עקב חשמל סטטי במכל סולר, ארה"ב 12/2008.



### היווצרות איורה דליקה

הגדרה - תערובת של אויר (חמצן) עם חומר דליק המתקיימת בתוך נפח כלשהו.

ישנם סוגים שונים של איורה דליקה, הנבדלים במצב הצבירה ובתצורה של החומר הדליק. איורה דליקה עשויה להתקיים כתרחיף באויר של חומרים בתצורה של אבקה, שבבים, סיבים, גז או תוצרי נוזל.

איורה דליקה שמקורה בנוזל תיתכן בתצורות הבאות: גז, אדים, טיפות, קצף, ערפל, והיא עשויה להתרחש באופן מיקרי (עקב דליפה, שבר בציוד או כשל באביזר) או באופן מתוכנן (כגון: פליטה מארובה, תחזוקה).

ישנם מספר תכונות ופרמטרים פיסיקליים המשפיעים על קיום איורה דליקה של הנוזל, ביניהם: נקודת ההבזקה, תחום דליקות, טמפרטורת הצתה עצמית, צפיפות אדים, קצף שנוצר בזרימת הנוזל, תנאי האיורור (טבעי או מלאכותי). בטבלה הבאה מציגה מספר נוזלים המוכרים משימוש ביתי ותעשייתי ותכונותיהם:

| הנוזל  | נקודת הבזקה, °c | תחום דליקות, % | טמפ' הצתה עצמית, °c | צפיפות אדים |
|--------|-----------------|----------------|---------------------|-------------|
| אצטון  | - 20            | 12.8 - 2.6     | 465                 | 2           |
| אתנול  | 12              | 27.7 - 3.1     | 400                 | 1.59        |
| מתנול  | 9.7             | 36 - 6         | 455                 | 1.1         |
| טולואן | 4               | 6.8 - 1.3      | 536                 | 3.2         |
| בנזין  | - 43            | 8 - 0.6        | > 260               | 3.47        |
| קרוסין | 70 - 60         | 7 - 0.7        | 210                 | 4.5         |
| סולר   | > 55            | 6.5 - 0.6      | > 220               | > 1         |

כאשר בוחנים אפשרויות להיווצרות אוירה דליקה בתהליך טיפול בנוזלים, נהוג להתייחס אל נקודת ההבזקה של הנוזל ולטמפרטורת הסביבה והתהליך. מסתבר שאלה אינם הגורמים היחידים לאוירה דליקה. בהזרמה של נוזלים מסוימים, כגון קרוסין וסולר, נוצרת שכבה של קצף על פני הנוזל, אשר מהווה סוג מיוחד של אוירה דליקה: הקצף מורכב מבועות, וכל בועה בקצף עשויה ממעטפת של נוזל שבתוכה אויר (חמצן)! עובי שכבת הקצף 1-20 mm, הוא עלול להיות גם דק ובלתי נראה, בעל יכולת להתלקח ובעל אנרגיה הצתה קטנה כבנזין וממסים אורגניים ( $< 1 \text{ mJ}$ ).

תכונה יוצאת דופן זו של הקצפה, נמצאה כגורם עיקרי לשריפות ענק שהתרחשו לפני 15 שנים בעולם במספר מפעלים להפקת מתכות (אוסטרליה, ארה"ב, מקסיקו). במחקר שנערך באוניברסיטת סאוטהאמפטון, אנגליה, התגלתה לראשונה תופעת ההקצפה והקשר לשריפות אלו, ונערכו ניסויים שאימתו את רגישות הקצף להצתה.



בתמונה זו מוצג חלק ממערך הניסוי באוניברסיטת סאוטהאמפטון, וניתן לראות בו את הבועות של הקצף בהזרמת הקרוסין:

### הצטברות מטעני חשמל סטטי בנוזלים

הגורם העיקרי לתופעת החשמל הסטטי הינו תהליך חיכוך בין חומרים. בדומה לחיכוך בין גופים מוצקים, גם תהליך חיכוך בין נוזל-גוף מוצק, או נוזל-נוזל או נוזל-גז, גורם להצטברות מטען חשמלי בחומרים שמשתתפים בתהליך בחיכוך. בין המאפיינים העיקריים בנוזל אשר משפיעים על עוצמת החיכוך ולכן גם על כמות המטען החשמלי ניתן למנות: מהירות זרימה, צמיגות, שטח פנים למגע, מערבולות, מספר פאזות. כאשר נוזל נמצא במצב דינמי בכלי כלשהו, ישנם משפיעים נוספים על החיכוך, כגון: הממדים וחומר המבנה של הכלי, טיב פני שטח המגע, טמפרטורה.

שתי תכונות פיסיקליות של הנוזל, משפיעות על האופן בו המטען החשמלי שנגרם בחיכוך עשוי להצטבר בנוזל: מוליכות חשמלית ומקדם דיאלקטרי יחסי. המוליכות החשמלית נקבעת ע"י הקיטוב או כמות היונים החופשיים בנוזל ונמדדת ביחידות של  $\text{pS/m}$ , המקדם הדיאלקטרי  $\epsilon_r$  נקבע ע"י מידת הקיטוב של החומר בהשפעת השדה החשמלי והינו ערך סקאלרי חסר יחידות.

| קטגורית המוליכות | ערך המוליכות בנוזלים       | ערך המוליכות בנוזלים בעלי $\epsilon_r \cong 2$ |
|------------------|----------------------------|--|
| מוליכות גדולה    | $> 10,000 \text{ pS/m}$    | $> 10,000 \text{ pS/m}$                        |
| מוליכות בינונית  | $25 - 10,000 \text{ pS/m}$ | $50 - 10,000 \text{ pS/m}$                     |
| מוליכות קטנה     | $< 25 \text{ pS/m}$        | $< 50 \text{ pS/m}$                            |

בנוזל בעל מוליכות חשמלית  $\rho$  ומקדם דיאלקטרי יחסי  $\epsilon_r$ , אשר יהיה נתון במנוחה בכלי מתכתי מוארק, תתאפשר זרימת המטען החשמלי אל הארקה בפרק זמן  $t$  הניתן לחישוב לפי הקשר הבא:

$$t = 5\tau, \quad \tau = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r / \rho$$

$$\epsilon_0 \text{ הינו המקדם הדיאלקטרי של הריק } (\epsilon_0 = 8.8541 \cdot 10^{-12} \text{ F/m})$$

בנוזלים בעלי מוליכות גבוהה ובינונית, ערך הזמן המתקבל בחישוב לעיל הינו קטן מאוד, חלקי שניות. לפיכך, במצב מעשי בו נוזל מאוחסן בכלי מתכתי מוארק, המטען החשמלי שנגרם עקב החיכוך בנוזל אינו מצטבר.

בנוזלים בעלי מוליכות קטנה זרימת המטען החשמלי אל הארקה תימשך זמן רב (שעות רבות), כך שמבחינה מעשית ניתן לומר שהמטען החשמלי מצטבר בהם. כאשר נוזלים מסוג זה נתונים בכלי מתכתי מוארק, מתרחשת בהם זרימת מטען חשמלי לארקה בתהליך איטי ושונה פיסיקלית מאשר בנוזלים בעלי מוליכות גדולה ובינונית.

בטבלה שלהלן מוצגים ערכי מוליכות חשמלית ומקדם דיאלקטרי יחסי של נוזלים שכיחים בתעשייה: הרקע הירוק מתייחס לנוזלים "מוליכים" כאלה בעלי מוליכות חשמלית גדולה או בינונית. הרקע האדום מתייחס לנוזלים "מבדדים", כאלה בעלי מוליכות חשמלית קטנה.

| מקדם דיאלקטרי | מוליכות חשמלית, $\rho S/m$ | הנוזל             |
|---------------|----------------------------|-------------------|
| 20.7          | $6 \cdot 10^6$             | אצטון             |
| 24.55         | $1.35 \cdot 10^5$          | אתנול             |
| 32.7          | $4.4 \cdot 10^7$           | מתנול             |
| 2.38          | 1                          | טולואן            |
| $\sim 2$      | $< 50$                     | בנזין (ללא עופרת) |
| 2.2           | 1 - 50                     | קרוסין            |
| $\sim 2$      | 0.1                        | סולר              |

### תהליכים תעשייתיים המהווים גורם למטען חשמלי בנוזלים

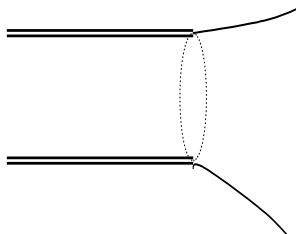
פעילויות רבות המבוצעות בהן מטופלים נוזלים במפעלי תעשייה, מהוות גורם למטען חשמלי בנוזלים. לרוב, בתכנון תהליכי יצור בהם מעורבים נוזלים לא ניתנת תשומת לב לעובדה זו, או שנעשה שימוש בכללי אצבע המיועדים להפחית סיכוני חשמל סטטי, מבלי שנבדק אם כללים אלו תקפים לתנאים הקיימים בתהליכי היצור.

מורכבות תופעת החשמל הסטטי מצד אחד, ומצד שני שכיחותה בתהליכי יצור, יוצרת בפני מתכננים והנהלות של מפעלים קושי בזיהוי מצבי סיכון, אשר נגרמים בעבודה השגרתית שמבוצעת במפעלים. בהכללה, ניתן לקבוע שכמעט כל תהליך שבו מתרחשת תנועה של נוזל, הינו תהליך שגורם למטען חשמלי בנוזל. מטען חשמלי שנגרם בתהליך חיכוך נהוג לכנות מטען אלקטרוסטטי.

להמחשת שכיחות זו מוצגים להלן מספר תהליכים תעשייתיים מוכרים, אשר גורמים באופן מובהק למטען חשמלי בנוזלים, והסבר קצר המתאר את "מנגנון ההיווצרות" האלקטרוסטטי של המטען החשמלי:

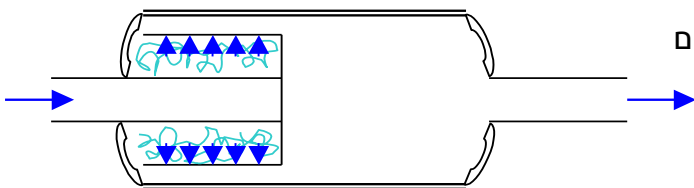
#### 1. זרימה בצנרת -

מתקיים חיכוך בין דופן הצינור לבין שכבת הנוזל הצמודה אליה, ועל כל אחת מהן מצטבר מטען חשמלי (בקיטוב שונה).



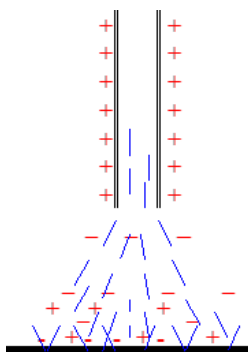
#### 2. הזרמה דרך מסנן -

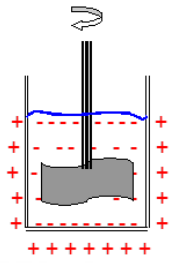
הנוזל מתפצל למאות נתיבי זרימה שיוצרים חיכוך עצום בגלל הגדלת שטח פני הנוזל הנתונים לחיכוך.



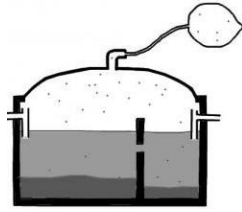
#### 3. התזה (מצינור או דיזה) -

התפצלות זרם הנוזל לטיפות ואתנגשות טיפות במשטח קשה, מהווה מהווה חיכוך ע"י ניתוק, שגורם מטען חשמלי בטיפות.

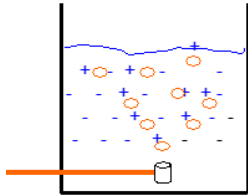




4. בחישה, עירבול -  
מתקיים חיכוך בין הנוזל לבין דפנות הכלי,  
ובין הנוזל לבין הבוחש.



5. הפרדת פאזות -  
בתהליך שקיעה-ציפה, נוצר חיכוך בין פרודות  
הנוזל השוקע לבין פרודות הנוזל הצף.



6. פיעפוע גז בנוזל -  
במעבר פרודות הגז אל פני הנוזל, מתקיים חיכוך  
בין הנוזל לבין פרודות הגז החולפות דרכו.



7. ריסוס, התזת צבע -  
התפצלות זרם הנוזל לטיפות בדומה להתזה, מהווה  
חיכוך ע"י ניתוק שגורם מטען חשמלי בטיפות.

מידת הסיכון להתלקחות עקב חשמל סטטי הטמונה בתהליכי עבודה אלו, תלויה כמובן באווירה דליקה שקיימת סביב או בתוך מתקני העבודה, אך בעיקר בכמות המטען החשמלי שמצטברת ובאפשרות שהאנרגיה של מטען חשמלי זה תהפוך לחום. ככל שתהליך הוא אינטנסיבי יותר ומטופלת בו כמות נוזל גדולה בקצב מהיר, כך גדול יותר קצב ההצטברות של המטען האלקטרוסטטי. בכדי שמטען אלקטרוסטטי יהפוך לאנרגית חום ברת הצתה, נדרשים תנאים פיסיקליים מסויימים, שיאפשרו התרחשות של תופעה הנקראת בשם "פריקה אלקטרוסטטית".

### התנהגות אלקטרוסטטית של נוזל בזרימה בתוך צנרת

בטבלה הבאה מובאים ערכים אופייניים של צפיפות מטען חשמלי שמצטבר בנוזל, כתוצאה מזרימה בתנאים שונים. צפיפות מטען חשמלי הינה כמות מטען ביחידת נפח של הנוזל, ונמדדת ב-  $\mu\text{C}/\text{m}^3$ .

| ערך אופייני | תצורת הזרימה  |
|-------------|---|
| 10          | זרימת נוזל בצינור מתכתי ללא מסנן                    |
| 100         | זרימת נוזל בצינור עם מסנן $30 - 150 \mu\text{m}$    |
|             | זרימת נוזל בצינור עם מסנן קטן מ- $30 \mu\text{m}$ : |
| 3000 - 2000 | בנוזל לא צמיג (כגון: קרוסין)                        |
| ~ 5000      | בנוזל צמיג בלתי מוליך                               |

סף הסיכון:  $30 \mu\text{C}/\text{m}^3$ . מעל ערך זה צפויה פריקה אלקטרוסטטית בעלת יכולת הצתה.

סף הבטיחות המומלץ:  $2.65 \mu\text{C}/\text{m}^3$ .

## מטען חשמלי ופריקה אלקטרוסטטית

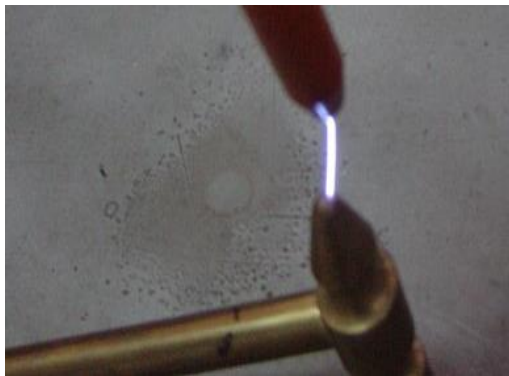
רוב האנשים אינם מצויים בנבכי התופעה של פריקה אלקטרוסטטית, ונוהגים לכנות אותה בשם "ניצוץ". מבחינה פיסיקלית, מבחינים במספר סוגים של פריקה אלקטרוסטטית, ולכל סוג ישנם מאפיינים אחרים הן בדרך ההתהוות של הפריקה והן ביכולת שלה לגרום הצתה לחומרים שונים.



"ניסוי העפיפון" של בנג'מין פרנקלין, בעזרתו הוכיח שהברק הוא פריקה של מטען חשמלי.

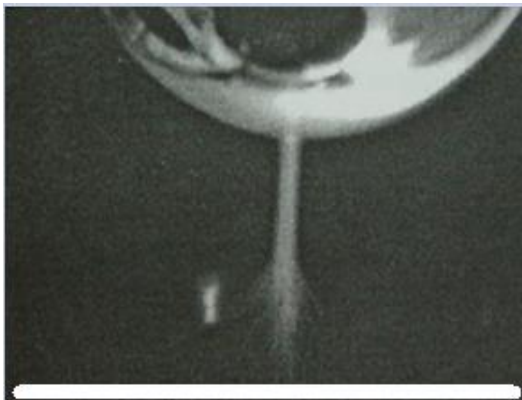
קיימים 4 סוגים של פריקות אלקטרוסטטיות הנפוצים בתהליכים תעשייתיים, 3 מהם מתקיימים גם בנוזלים. המאפיינים של פריקות אלה ותכונות ההצתה שלהן מתוארים להלן:

פריקת ניצוץ - מעבר של מטען חשמלי בין "גוף מוליך" אחד אל "גוף מוליך" אחר. "גוף מוליך" הוא גוף כלשהו העשוי כולו או רובו מחומרים המסוגלים להעביר דרכם זרם חשמלי, דהיינו, בעלי התנגדות חשמלית קטנה, כגון: גוף האדם, אביזרים העשויים/מכילים מתכת, נוזל בעל מוליכות חשמלית גבוהה. לרוב, פריקה כזו מתרחשת בין גוף מוליך הנושא מטען אלקטרוסטטי, לבין גוף מוליך אחר שנמצא במצב מוארק. כמות המטען החשמלי שגוף מוליך עשוי לצבור תלויה בקיבול החשמלי של הגוף, ולפיכך אינה מוגבלת. לכן בפריקת ניצוץ, אנרגיית הפריקה עלולה להגיע עד  $1000 \text{ mJ}$  ויותר, והיא מסוגלת להצית כל סוג של אוירה דליקה.



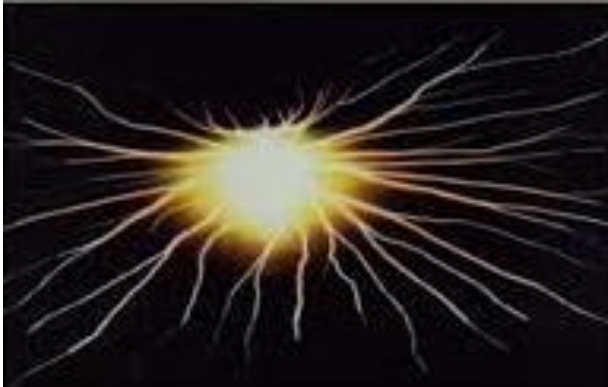
פריקת ניצוץ: מעבר אנרגיה שמרוכזת בנתיב צר וחס מאוד.

פריקת מברשת - מעבר של מטען חשמלי בין "גוף מבדד" לבין גוף מוליך. "גוף מבדד" הוא גוף העשוי כולו או רובו מחומר מבדד חשמלית כגון: זכוכית, חרסין, פלסטי, נוזל בעל מוליכות חשמלית קטנה. פריקה זו מתרחשת כאשר גוף מוליך מתקרב אל גוף מבדד הנושא מטען אלקטרוסטטי. מאחר והמטען החשמלי מצטבר בגוף מבדד חשמלית, אין לגוף קיבול חשמלי במובנו הרגיל, והוא יכול לצבור כמות המטען מרבית מסויימת שמעבר לה יתרחש יינון של האויר סביב הגוף ועודף המטען ידלוף מהגוף. כאשר תתרחש פריקת מברשת, אנרגיית הפריקה המרבית תגיע עד כ-  $3 \text{ mJ}$ , והיא מסוגלת להצית אוירה דליקה של נוזלים וגזים בלבד.



פריקת מברשת: מעבר אנרגיה מפוזר, דמוי מברשת.

**פריקת מברשת מתגלגלת (PBD) - פריקה זו מתרחשת בגוף מבדד (בעל צורה שטוחה) ששני צידיו נושאים מטען חשמלי בקיטוב הפוך. כמות המטען החשמלי המרבי שיכולה להצטבר על גוף כזה גדולה בסדרי גודל מאשר כמות המטען בגוף מבדד הטעון בקיטוב יחיד. לכן, עוצמת הפריקה הזו הינה גדולה מאוד, אנרגיית הפריקה עלולה להגיע עד 1000 mJ ויותר, והיא מסוגלת להצית כל סוג של אוירה דליקה.**  
 שתי תצורות בהן מתרחשת פריקה זו: (1) מעבר מטען חשמלי כמו בפריקת מברשת, מפני השטח אל גוף מוליך. (2) מעבר מטען חשמלי דרך גוף מבדד מצד אחד לצד שני. כלומר, נוצרת פריצה חשמלית בתוך החומר המבדד של הגוף, והמטען החיובי והמטען השלילי מאיינים זה את זה.



פריקת מברשת מתגלגלת: מוקד אנרגיה מרוכז, ממנו האנרגיה מתפזרת לצדדים.

### פריקה אלקטרוסטטית והצתת אוירה דליקה

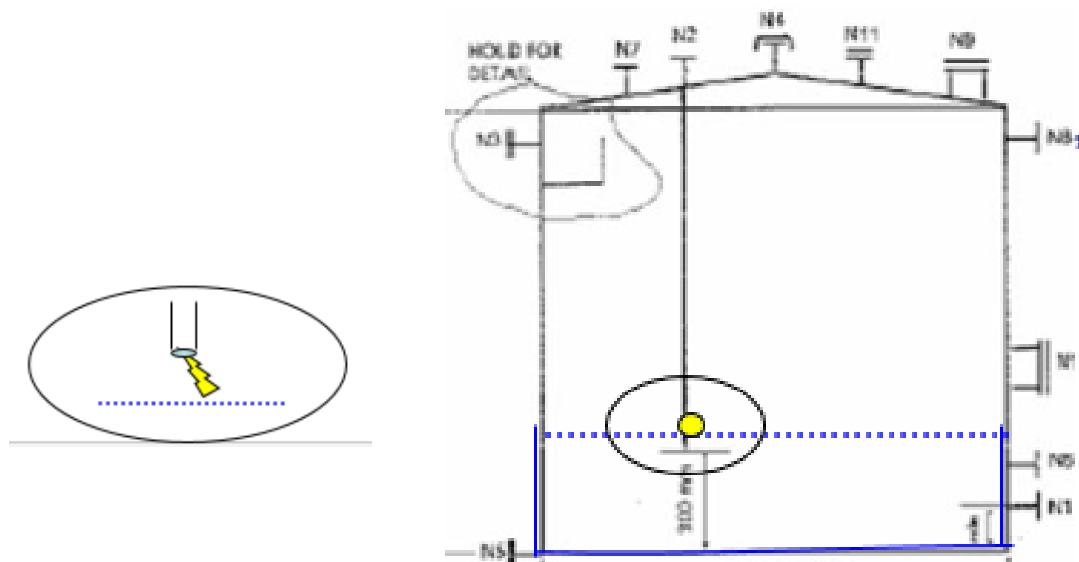
ניתן לאפיין 4 שלבים בתהליך של התרחשות הצתה ע"י מטען אלקטרוסטטי:

1. גוף כלשהו הנושא מטען חשמלי ונמצא במרחב של אוירה דליקה (גוף = אובייקט מוצק, נוזל צבור, גז מיונן).
2. עוצמת השדה החשמלי סביב הגוף הטעון גדולה מספיק בכדי לגרום קריסה של הבידוד של האויר (יוניזציה) בינו לבין גוף מוליך אחר.
3. בין שני הגופים נוצר מעבר באויר של מטען חשמלי (זרם) בעל צפיפות אנרגיה גדולה, אשר גורמת לחימום נתיב הזרימה לטמפרטורה של מאות מעלות צלזיוס.
4. הטמפרטורה הגבוהה גורמת להצתת האוירה הדליקה, כאשר וטמפרטורה זו גבוהה מטמפרטורת ההצתה העצמית של פרודות האדים/גז של החומר הדליק.

### חישוב תנאי הצתה בהזרמת נוזלים אל מכלי אחסון

הצטברות של מטען חשמלי שיגרום להצתת אוירה דליקה ע"י פריקה אלקטרוסטטית, אפשרית הן בנוזל מוליך והן בנוזל מבדד. במכלי אחסון קבועים, קיימת סכנה של פריקה אלקטרוסטטית בתוך המכל, בין פני הנוזל לבין אביזר מתכתי המותקן במכל או לאביזר המוחדר אליו (במכלי אחסון ניידים קיימים מרכיבי סיכון נוספים). המטען החשמלי בנוזל יוצר פוטנציאל חשמלי על פני הנוזל, וכאשר הפרש הפוטנציאלים בין פני הנוזל לבין האביזר גדול מספיק בכדי לפרוץ את מירווח האויר שביניהם, נוצרת פריקה אלקטרוסטטית שעלולה להצית את האוירה הדליקה שבמכל. פריקת מברשת ברת הצתה תיתכן כאשר הפוטנציאל החשמלי על פני נוזל מבדד יהיה  $\theta \geq 25,000 \text{ volt}$ .

בסכמה שלהלן מוצג מכל אחסון שבו מותקן צינור מתקרת המכל (אך אינו מגיע לקרקעית המכל). כאשר מוזרם נוזל לתוך המכל פני הנוזל עולים, וכאשר יגיעו סמוך לקצה הצינור תיתכן פריקה אלקטרוסטטית מפני הנוזל אל הצינור.



כאשר נוזל מוזרם בצנרת אל מכל שעשוי מחומר מבדד, המטען החשמלי יצטבר בנוזל שבמכל, הן בנוזל מוליך והן בנוזל מבדד. תיתכן הצתה עקב פריקת ניצוץ (מנוזל מוליך) או פריקת מברשת (מנוזל מבדד). לכן שימוש במכלים כאלה אינו מומלץ, ואם קיים אילוץ לשימוש כזה (עקב קורוזיה) יש לנקוט באמצעי הגנה מיוחדים. כאשר נוזל מוזרם אל מכל שעשוי מחומר מוליך, המטען החשמלי שבנוזל צפוי לדעוך בקצב מהיר (בנוזל מוליך) או בקצב איטי (בנוזל מבדד). לרוב, מכלי אחסון קבועים, עיליים או מוטמנים, עשויים מחומר מתכת.

המטען החשמלי שנגרם בהזרמת נוזל מוליך אל מכל מוליך, צפוי לדעוך בגלל זליגה להארקה דרך דפנות המתכת של המכל, בקצב שניתן לחישוב על פי המוליכות החשמלית והמקדם הדיאלקטרי של הנוזל. צפיפות המטען החשמלי במכל מחושבת כדלקמן:

$$\rho_t = \rho_p \frac{\tau}{t_{D.P.}} \left( 1 - e^{-\frac{t_{D.P.}}{\tau}} \right) \quad c/m^3$$

$\rho_t$  - צפיפות המטען החשמלי לאחר זמן  $t_{DP}$ .

$\rho_p$  - צפיפות המטען החשמלי בנוזל שבצנרת.

$t_{DP}$  - זמן ההזרמה אל המכל.

$\tau$  - מקדם הדעיכה של הנוזל.

המטען החשמלי שנגרם בהזרמת נוזל מבדד אל מכל מוליך, צפוי לדעוך בקצב איטי מאוד יחסית לנוזל מוליך, ובאמצעות תהליך שבו מטעני החשמל (החד קוטביים) שבנוזל מתרחקים אחד מהשני עד לדפנות המכל. קצב הדעיכה בנוזל מבדד ניתן לחישוב על פי המוליכות של הנוזל, וצפיפות המטען החשמלי במכל מחושבת כדלקמן:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \mu \rho_0 t_{D.P.} / \epsilon} \quad C/m^3$$

$\mu$  - מוליכות של הנוזל.

הפוטנציאל האלקטרוסטטי שנוצר על פני הנוזל, במכל צר וגבוה, מחושב לפי צפיפות המטען החשמלי, ממדי המכל והמקדם הדיאלקטרי של הנוזל, כדלקמן:

$$\phi_{SURF} = (1/16) \rho_t d^2 / [\epsilon_0 (1 + \epsilon_t)] \quad Volt$$

### דוגמאות חישובים של צפיפות מטען ופוטנציאל חשמליים במילוי מכלים

דוגמא 1 - מילוי נוזל מוליך לתוך מכל, במהירות קטנה

מכל אליו מזרימים נוזל בנפח של  $85.9 \text{ m}^3$  עד לגובה  $600 \text{ mm}$  ומגע בצינור פנימי, באמצעות צינור בקוטר  $0.8 \text{ m}$ , מהירות הזרימה של  $0.8 \text{ m/s}$ , זמן ההזרמה הוא  $200 \text{ sec}$ , מוליכות הנוזל  $90 \text{ pS/m}$ , מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r = 2$ .

$$\tau = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2}{90 \cdot 10^{-12}} = 0.196 \text{ sec} \quad I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8^2 \cdot 0.8^2 = 1.536 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{600}}{c_{600}} = \frac{1.536 \cdot 10^{-6} \cdot 200}{85.9} = 3.576 \cdot 10^{-6} \text{ c/m}^3$$

$$\rho_t = \rho_p \frac{\tau}{t_{600}} \left( 1 - e^{-\frac{t_{600}}{\tau}} \right) = 3.576 \cdot 10^{-6} \frac{0.196}{200} \left( 1 - e^{-\frac{200}{0.196}} \right) = 0.00368 \cdot 10^{-6} \text{ c/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 0.00368 = 0.019 \text{ kV}$$

הפוטנציאל החשמלי המחושב על פני הנוזל ברגע המגע בצינור הפנימי הוא:  $19 \text{ volt}$ , המהווה ערך זניח שבו לא תיתכן פריקת ניצוץ, ולכן אין בו סיכון להצתת אוירה דליקה.

## דוגמא 2 - מילוי נוזל מבדד לתוך מכל, במהירות קטנה

מכל אליו מזרימים נוזל בנפח של  $4.8 \text{ m}^3$  עד לגובה  $300 \text{ mm}$  ומגע בצינור פנימי, באמצעות צינור בקוטר  $0.1 \text{ m}$ , מהירות הזרימה של  $0.8 \text{ m/s}$ , זמן ההזרמה הוא  $687 \text{ sec}$ , מוליכות הנוזל  $0.1 \text{ pS/m}$ , מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r = 2.1$ .

$$\tau_{theor} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.1}{0.1 \cdot 10^{-12}} = 185.85 \text{ sec}$$

$$I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8^2 \cdot 0.1^2 = 0.024 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{300}}{c_{300}} = \frac{0.024 \cdot 10^{-6} \cdot 687}{4.8} = 3.435 \cdot 10^{-6} \text{ c/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 3.435 = 18.24 \text{ kV}$$

הפוטנציאל החשמלי המחושב על פני הנוזל ברגע המגע בצינור הפנימי הוא:  $18,240 \text{ volt}$ , המהווה ערך גבוה אך עדיין מתחת לפוטנציאל של  $25,000 \text{ volt}$ , שהוא ערך הסף לפריקת מברשת ברת הצתה.

## דוגמא 3 - מילוי נוזל מבדד לתוך מכל, במהירות מוגברת

מכל אליו מזרימים נוזל בנפח של  $4.8 \text{ m}^3$  עד לגובה  $300 \text{ mm}$  ומגע בצינור פנימי, באמצעות צינור בקוטר  $0.1 \text{ m}$ , מהירות הזרימה של  $1.2 \text{ m/s}$ , זמן ההזרמה הוא  $510 \text{ sec}$ , מוליכות הנוזל  $0.1 \text{ pS/m}$ , מקדם דיאלקטרי  $\epsilon_r = 2.1$ .

$$\tau_{theor} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.1}{0.1 \cdot 10^{-12}} = 185.85 \text{ sec}$$

$$I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 1.2^2 \cdot 0.1^2 = 0.054 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{300}}{c_{300}} = \frac{0.054 \cdot 10^{-6} \cdot 510}{4.8} = 5.732 \cdot 10^{-6} \text{ c/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 5.732 = 30.43 \text{ kV} \square 25 \text{ kV}$$

מהירות ההזרמה למכל הוגדלה מ-  $0.8 \text{ m/s}$  ל-  $1.2 \text{ m/s}$ , הפוטנציאל החשמלי המחושב על פני הנוזל ברגע המגע בצינור הפנימי הוא:  $30,430 \text{ volt}$ , המהווה ערך גדול מ-  $25,000 \text{ volt}$ , שהוא ערך הסף לפריקת מברשת ברת הצתה. החישוב מראה שמילוי המכל בתנאים שתוארו בדוגמא זו, מהווים סכנה, ועלולה להתרחש פריקת מברשת ברת הצתה בתוך המכל.

## סיכום

1. הפרמטרים הפיסיקליים המשפיעים על סיכון ההתלקחות בהזרמה ומילוי מכלים, מתייחסים למבנה המכלים, לתכונות הנוזלים, ולתכן ההנדסי של מערך ההזרמה והמילוי.
2. לא ניתן להחיל "הנחיה כללית" של הזרמת נוזל במהירות קטנה מ-  $1 \text{ m/sec}$ , אשר תבטיח מניעת התלקחות בכל סוגי הצינורות והמכלים. ישנם מצבים שגם במהירות כזו עלולה להתרחש הצתה.
3. סיכוני התלקחות מחשמל סטטי ניתנים לחישוב ולהערכה באופן כמותי, באמצעות ניתוח פיסיקלי ומתמטי.
4. בתהליכים בהם מטופלים נוזלים דליקים, אין להסתמך על מידע כללי מתקנים וספרות, אלא יש לבחון את סיכוני ההתלקחות הצפויים מחשמל סטטי, באמצעות בדיקה פרטנית שבה יבחנו כל מרכיבי המתקן ותנאי ההפעלה שלו.



## איל צדוק

מהנדס מוסמך לבקרת חשמל סטטי, מומחה לניתוח סיכוני חשמל סטטי ולציוד חשמלי המיועד לאווירה דליקה. בעל השכלה בפיסיקה והנדסת חשמל. החל את עבודתו בתחומים אלו ב- 1980 ברפא"ל / משהב"ט, משמש מאז כיועץ-מומחה לניתוח סיכונים ואווירה דליקה, כשל והפרעות חשמל סטטי במפעלי תעשייה בתחומים: חומרי נפץ, כימיה, דלק ופטרוכימיה, אבקות מזון, תרופות, פלסטיקה, מיקרואלקטרוניקה, אלקטרואופטיקה, אלקטרוניקה.

בעל תעודת הסמכה בינלאומית לחשמל סטטי של איגוד המהנדסים iN.A.R.T.E. (מס' ESD-00154-NE).  
חבר באירגון הבינלאומי Electrostatic Discharge Association (מס' 20020477).  
חבר באירגון הבינלאומי של מהנדסי החשמל והאלקטרוניקה IEEE (Senior Member No. 40214008).  
חבר באירגון Electrostatic Society of America (ESA).  
יו"ר הפורום הישראלי לחשמל סטטי באגודת מהנדסי הכימיה וכימאים, לשכת המהנדסים בישראל.