



קבוצת בזן
מחויבים למחר

מנגנוני פריקות חשמל סטטי בתהליכים תעשייתיים



שי שגב

מקורות הצתה פוטנציאליים – לפי ת"י 60079



1. משטחים חמים.
2. דחיסה אדיאבטית.
3. אולטראסאונד.
4. קרינה מייננת.
5. להבה גלויה.
6. תגובה כימית.
7. קרינה אופטית.
8. קרינה אלקטרומגנטית.
9. **פריקת חשמל סטטי**
10. ניצוצות מכאניים (חיכוך או מכה)
11. ניצוצות חשמליים
12. קשתות חשמליות.
13. קרינה מייננת.

חשמל סטטי – מקור ההצתה הסמוי

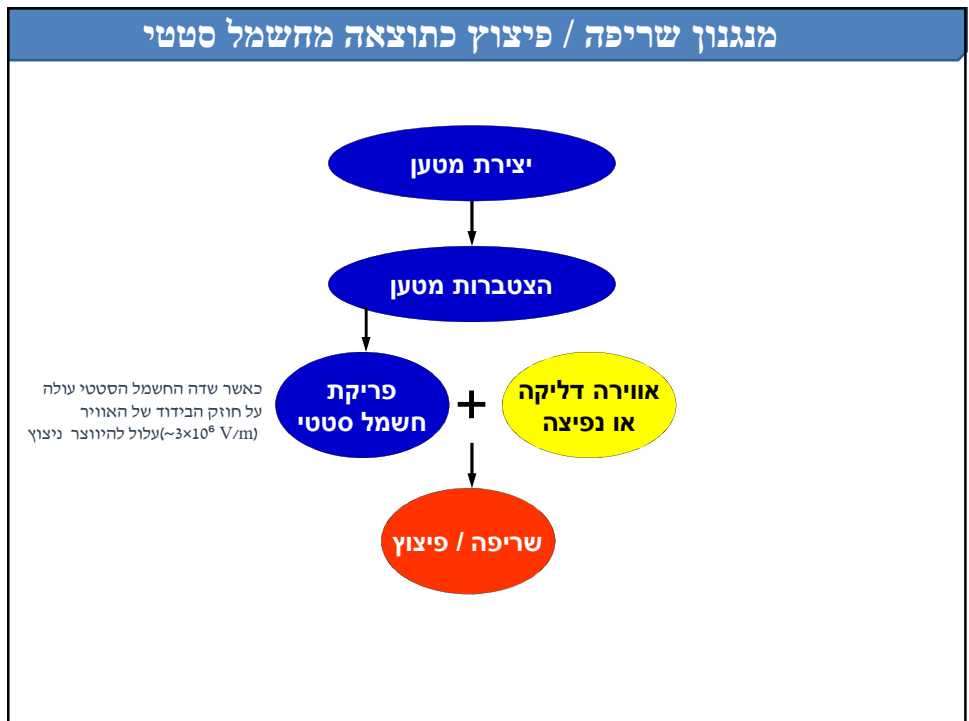
29 הרוגים בגרמניה במהלך הדגמת מעי כיבוי ב- CO₂ במיכל דסייל בגרמניה

Niederstedem Tank Explosion
EPSC Learning Sheet April 2026

What Happened:
September 1953 an aircraft fuel storage farm was taken into use in Niederstedem Germany. The automatic fire extinguishing system, using CO₂ was demonstrated to visitors that were on the roof of the storage tank.
The tank containing an explosive mixture, suddenly ignited and exploded. 29 people lost their lives in the incident.




בניגוד לרוב מקורות ההצתה האחרים, **הצתה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי יכולה להתרחש גם במהלך עבודה שגרתית (ללא כשל ציוד או חריגה באחד מהפרמטרים התפעוליים)**





היווצרות מטען חשמל סטטי – ע"י השראה

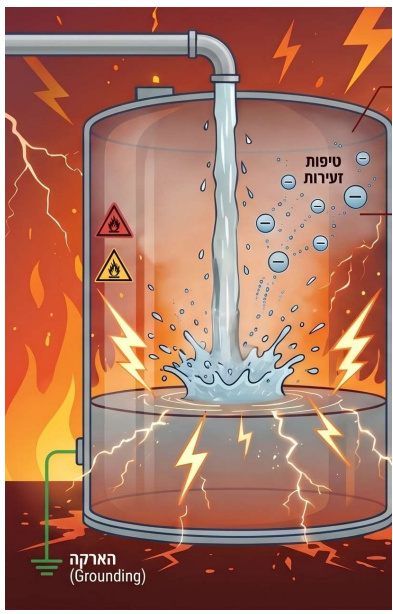


```

            graph TD
            A[יצרת מטען] --> B[הצטברות מטען]
            B --> C[פריקת חשמל סטטי]
            B --> D[אווירה דליקה או נפיצה]
            C --> E[שריפה / פיצוץ]
            D --> E
            
```

השדה החשמלי בצנרת הפלסטיק יוצר קיטוב פנימי של האלקטרונים באוגן

מילוי בהתזה (splash filling)



```

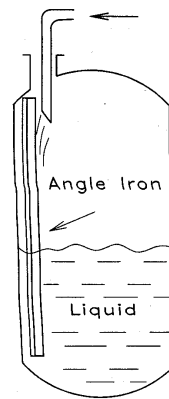
            graph TD
            A[יצרת מטען] --> B[הצטברות מטען]
            B --> C[פריקת חשמל סטטי]
            B --> D[אווירה דליקה או נפיצה]
            C --> E[שריפה / פיצוץ]
            D --> E
            
```

החיכוך של זרם הנוזל עם האוויר והשבירה של זרם הנוזל לטיפות גורמת להיווצרות מטען חשמלי.

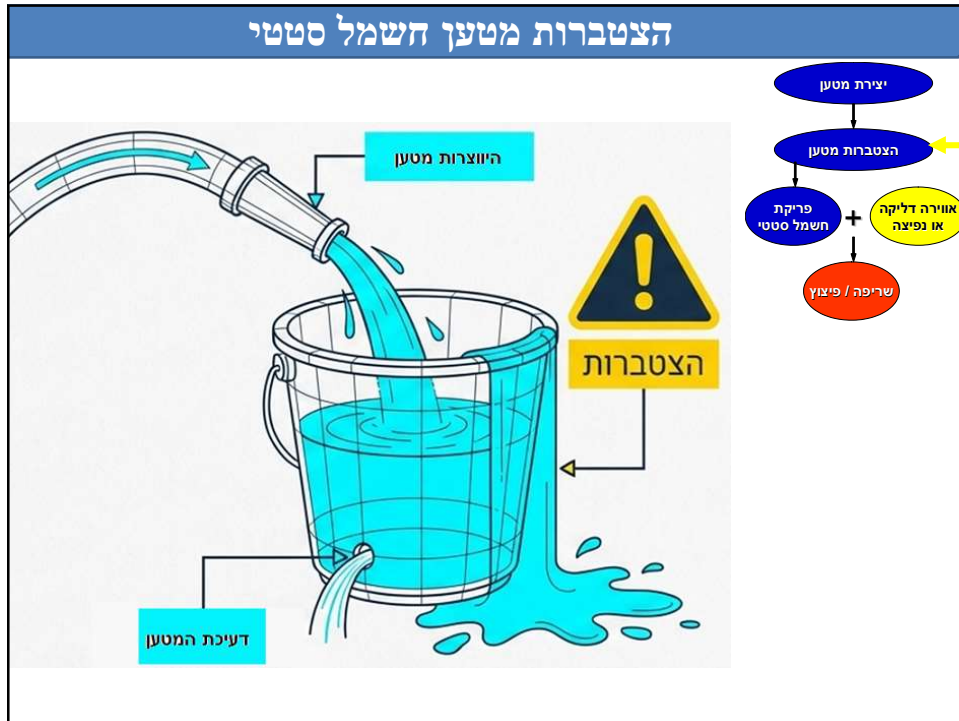
דוגמה להצתה במהלך מילוי בהתזה



מילוי בהתזה (splash filling)



- א. שימוש בטובלן (Dip pipe).
- ב. הגבלת מהירות הזרימה ל- 1 מ' / שניה עד שהטובלן שקוע בנוזל בגובה של לפחות 2 קטרים.



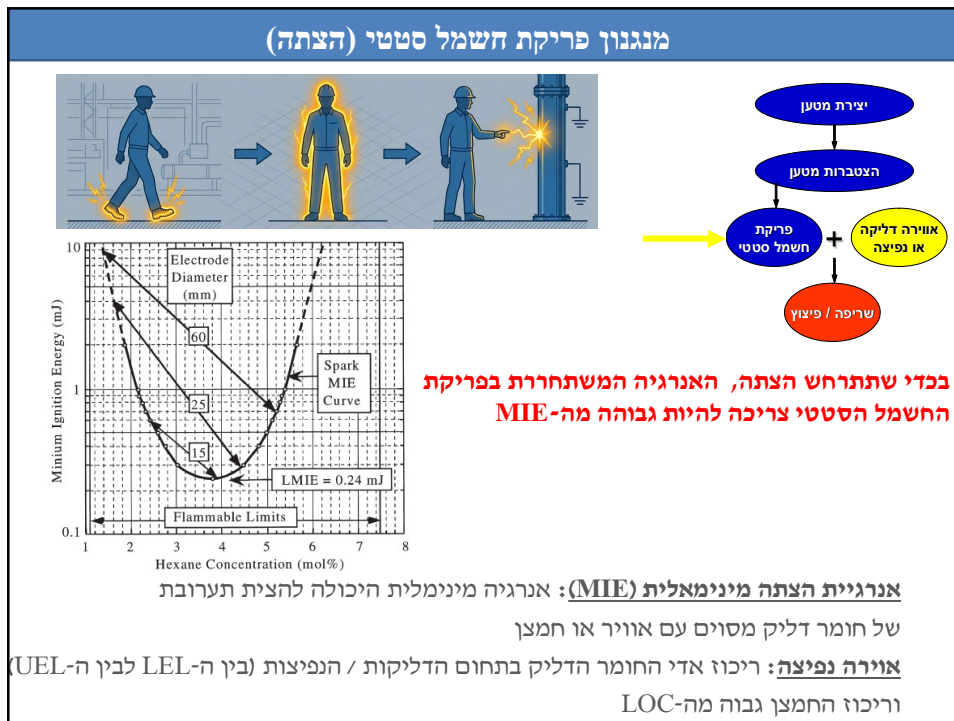
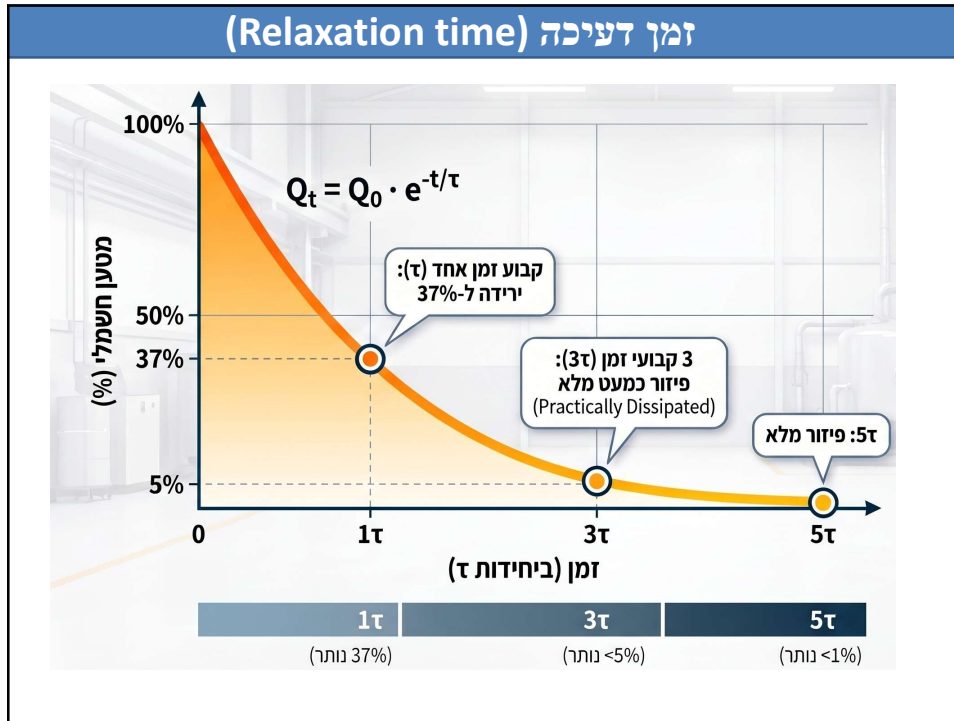
הצטברות מטען



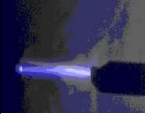
מטען יכול להצטבר על גבי:

- מתכת צפה – מתכת שאינה מוארקת
- נוזלים מבודדים (לדוגמא: טולואן, הקסאן)
❖ נוזל מבודד : נוזל בעל מוליכות חשמלית הנמוכה מ- 50 Ps/m
- נוזלים מוליכים (כגון: מים, מתנול) שאינם בתוך מערכת מוארקת
❖ נוזל מוליך : נוזל בעל מוליכות חשמלית הגבוהה מ- 50 Ps/m
- אבקות מבודדות או אבקות מוליכות שאינן בתוך מערכת מוארקת
- אנשים






סוגי פריקות חשמל סטטי



❖ **פריקת ניצוץ (Spark Discharge)** - פריקה בעוצמה של עד 100 mJ.
מתרחשת כתוצאה מפריקת מטען סטטי שהצטבר על גוף מוליך בלתי מוארק ולכן ניתנת למניעה בעזרת גישורים והארקות.

❖ **פריקת מברשת (Brush Discharge)** - פריקה בעוצמה של עד 4 mJ. פריקת נברשת מתרחשת כתוצאה ממגע בין גוף מוארק לגוף בלתי מוליך הטעון בקוטביות אחרת. לא ניתן למנוע אותה בעזרת גישורים והארקות



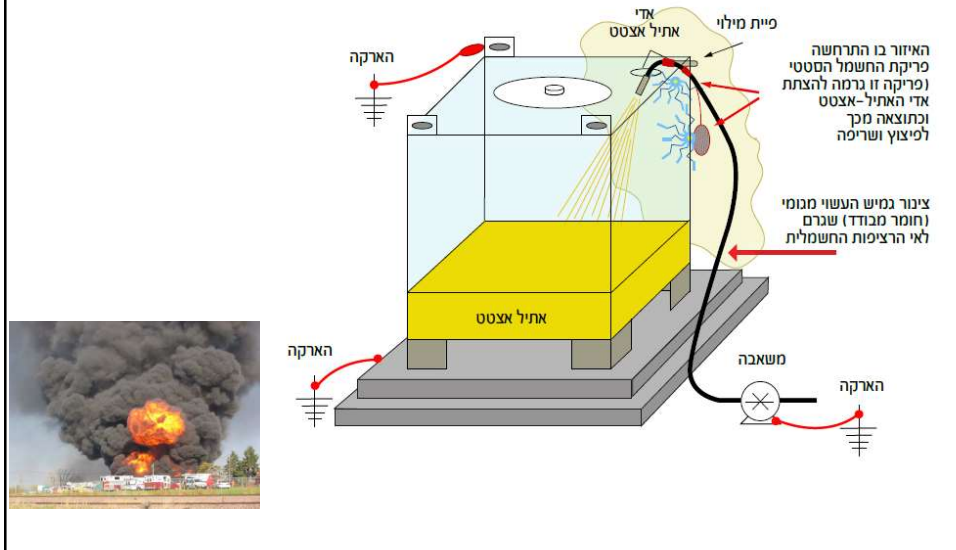
❖ פריקת מברשת מתגלגלת (Propagating Brush Discharge)

❖ פריקה קונית (Cone Discharge)

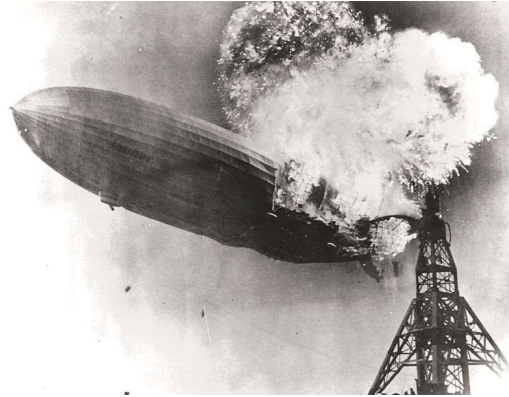
❖ פריקת קורונה (Corona Discharge)



דוגמא לפריקת ניצוץ



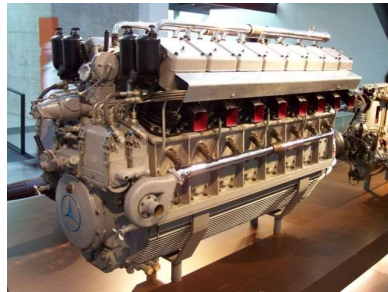
פריקת ניצוץ – ספינת האוויר הינדנבורג



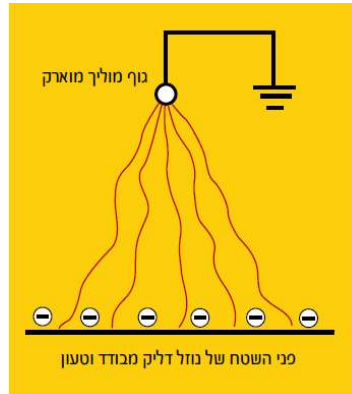
- הספינה נבנתה בשנת 1935, וטסה לראשונה במרץ 1936. גופה נבנה מאלומיניום, אורכה היה 245 מטר (פי עשרה מספינת אוויר ממוצעת), וקוטרה היה 41 מטר. היא הכילה 200,000 מ"ק של מימן, ב-16 תאים נפרדים.

פריקת ניצויץ – ספינת האוויר הינדנבורג

- הספינה הונעה בארבעה מנועי דיזל תוצרת מרצדס, בעלי הספק של 1,200 כ"ס כל אחד. מהירותה המרבית הייתה 135 קמ"ש. היא נשאה 61 אנשי צוות, ו-50 עד 72 נוסעים.
- הספינה הכילה אפילו חדר עישון שהיה בעל לחץ.



מנגנון פריקת מברשת מפני השטח של נוזלים מבודדים



נוזל מבודד – נוזל בעל התנגדות
נפחית של פחות מ- $10^4 \Omega m$

פיצוץ מיכל נפטא (סולבנט מבודד) ,
2:58 דקות

הפריקה מתרחשת מפני השטח של הנוזל המבודד והטעון אל גוף מוליך מוארק.
מאחר והפריקה היא מכל פני השטח, היא נראית בצורה של מעין מברשת.



פיצוץ ושריפה במיכל סולר – בית זיקוק אשדוד 1997

Explosion and Fire in a Gas-Oil Fixed Roof Storage Tank: Case Study and Lessons Learned

Yigal Riezel
Oil Refineries Ltd., Ashdod, Israel 77102



On November 2, 1997, a fixed roof gas-oil tank located in the tank farm of Ashdod Oil Refinery exploded, causing the death of one Sample Man, and a fire in two adjacent tanks located in the same dike. The fire lasted less than 3 hours, but there was significant public concern about the necessity for emergency evacuation from two neighboring settlements.

Emergency operations of the refinery and outside services were very effective, and fires in both tanks and the dike were put out without any additional damage to other equipment in the tank farm. The source fire was classified as a heavy top phase pool fire.

The investigation pointed out that hydrogen was the source of the explosive mixture in the tank. Hydrogen penetrated the tank as a result of non-complex gas-oil stripping at the exit of a hydrocracking unit. The source of ignition was an electrostatic spark initiated by synthetic rope (instead of a cotton one) used with a device to obtain samples from the tank.

After the accident, it was found that a similar scenario was reported about 15 years earlier. However, it was not disseminated widely enough through accident databases.

INTRODUCTION
There is no doubt that storage tanks at an oil refinery are a high-risk area. A very tall smoke cloud dispersed towards the northeast (the center of the country) and, without harming any settlement, wandered under very low wind velocity about 40 km until it vanished.

An investigation started immediately, but at the same time, an experienced safety adviser of a famous refining corporate abroad contacted the company. The expert's main question was: "In Plant's Oilgram News of November 1997, it was indicated that a diesel tank exploded in the Ashdod refinery. Under normal circumstances it is virtually impossible to have an explosion in a diesel tank. So, what happened?"

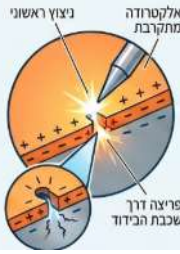
The reality showed that the possibility for such an explosion is there. The thorough investigation aimed at identifying the root causes focused on hydrogen contamination in the gas-oil. Some weaknesses in the system contributed to the accident and illuminated a few basics that should always be kept in mind and applied to tank design and operation.

- It is better to brainstorm ahead than investigate later.
- Inherently safer alternatives should always be sought.
- Wide circulation of accident data and lessons learned can assist all who deal with hazardous materials.
- Comprehensive application of Process Safety Man-

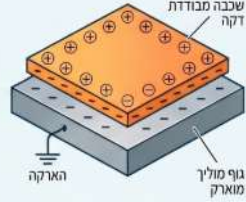
פריקת מברשת מתגלגלת

א. גוף מבודד נושא מטענים מנוגדים בשני צדדיו (שכבת מטען כפולה).
ב. התהליך מתחיל כפריקת מברשת רגילה, אולם לאחר מכן הפריקה מתפשטת על פני כל המשטח הטעון, ומשחררת כמות אנרגיה גדולה.

שלב 2: טריגר הפריקה
קצר חשמלי הנוצר עקב התקרבות למשטח, או "פריצה" חשמלית/מכנית דרך שכבת הבידוד בנקודת תורפה.



שלב 1: היווצרות מבנה "קבל"
הצטברות מטען על שכבה מבודדת דקה (פחוח 8-ממ) המנובה בגוף מוליך מוארק; מטענים מנוגדים נערכים משני צידי הבידוד ויוצרים צפיפות מטען גבוהה ($250 \mu\text{C}/\text{m}^2$).



פיצוץ מיכל עם גג צף בחוות המכלים של Conoco Phillips

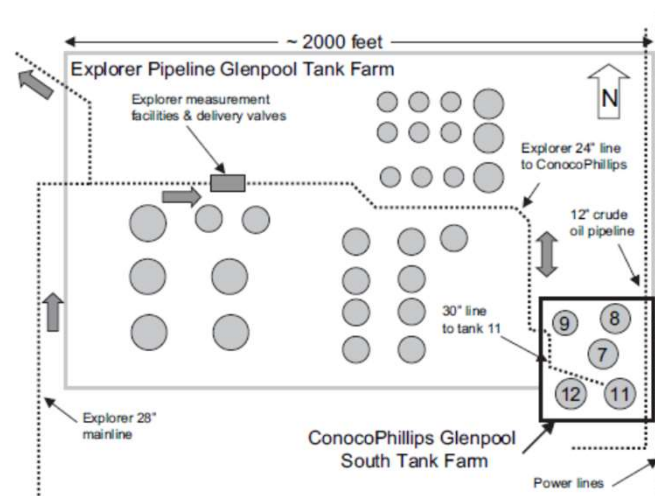


Figure 1. Schematic of Explorer Pipeline Glenpool tank farm and ConocoPhillips Glenpool South tank farm showing tank 11, pipelines, and power lines located along dike east of Glenpool South tank farm.

25

Switch Loading

מה קרה?!

במהלך החלפת החומר המאוחסן במיכל מס' 11 מבנזין לסולר התרחש במיכל פיצוץ.

הפיצוץ לווה בשריפה שנמשכה 21 שעות, פגעה ב-2 מכלים נוספים וגרמה לנזק ישיר של 2.5 מיליון דולר.



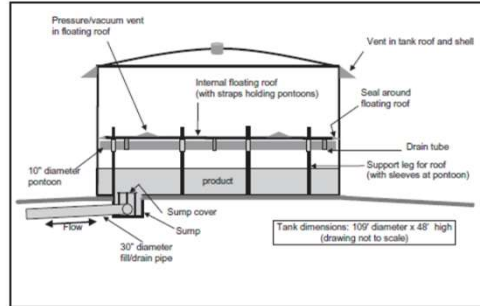
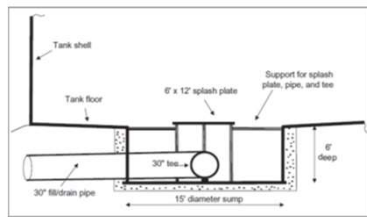
26

Switch Loading

איך קרה?

בגמר ריקון המכל מהבנזין (חומר עם לחץ אדים גבוה), כאשר הגג הצף נשען על הרגליים נשאר בערך 10 מ"ק בנזין בין רצפת המכל לתחתית צינור המילוי.

כתוצאה מכך האוויר בין רצפת המיכל לבין הגג הצף היתה בריכוז הגבוה מסף הנפיצות העליון (UEL).



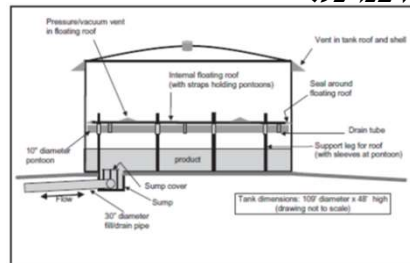
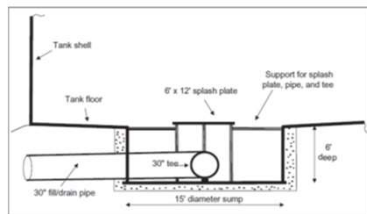
סקיצה של מיכל 11

Switch Loading

איך קרה?

מילוי הסולר (נוזל בעל מוליכות נמוכה ולחץ אדים נמוך), "דילל" את הפאזה הגזית וגרם לכך שהיא תמצא בתחום הנפיצות (בין ה-LEL ל-UEL).

מהירות המילוי הגבוהה של הסולר (מהירות של כ-3 מ'/'שניה) כאשר ההמלצה של תקן API 2003 ותקן NFPA 77 היא למהירות מילוי מקסימלית של 1 מ'/'שניה, גרמה לפריקת חשמל סטטי ולהצתת האוויר הנפיצה במיכל.



סקיצה של מיכל 11

פריקת קורונה

NASA Toroidal ring למניעת הצתה של מימן בקו הונט כתוצאה מפריקת קורונה

פתרון הנדסי: טבעת נאס"א (NASA Toroidal Ring)



הערה: הטבעת לא תמנע פריקת חשמל סטטי כתוצאה ממהירויות זרימה גבוהות / זרימה זו פאזית.

עבודה עם ביובית- תרחיש הסיכון:

- פיצוץ מיכל הביובית
- הצתת פחמימנים כתוצאה מפריקת חשמל סטטי
- הצתת פחמימנים כתוצאה ממקורות הצתה הנמצאים בביובית (אגוז חם, מע' חשמל, משאבה אשר אינה מוגנת פיצוץ וכד')



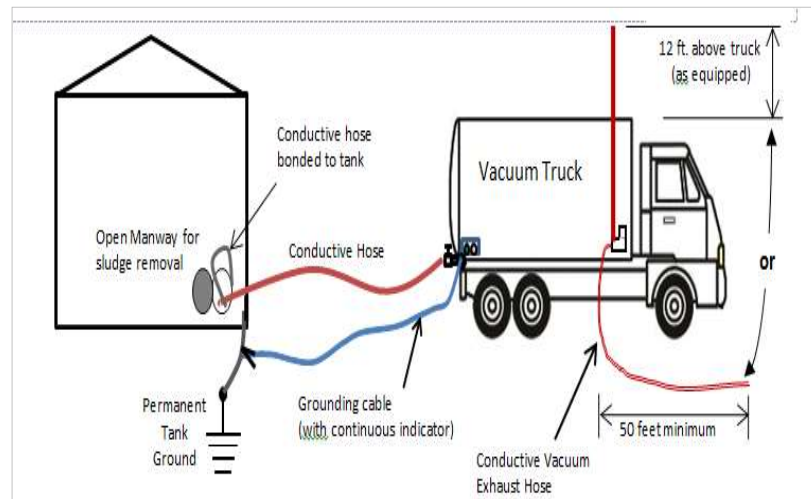
פיצוץ ביובית ב-BLSR בטקסס- 3 הרוגים+ 4 פצועים

עבודה עם ביובית- דגשים ובקורות לשאיבת פחמימנים:

- שימוש בצנרת אנטיסטטית
- הארקת הביובית
- הפניית האדים שיוצאים צנרת גמישה למקום בטוח המרוחק לפחות 15 מ' מהמכלית



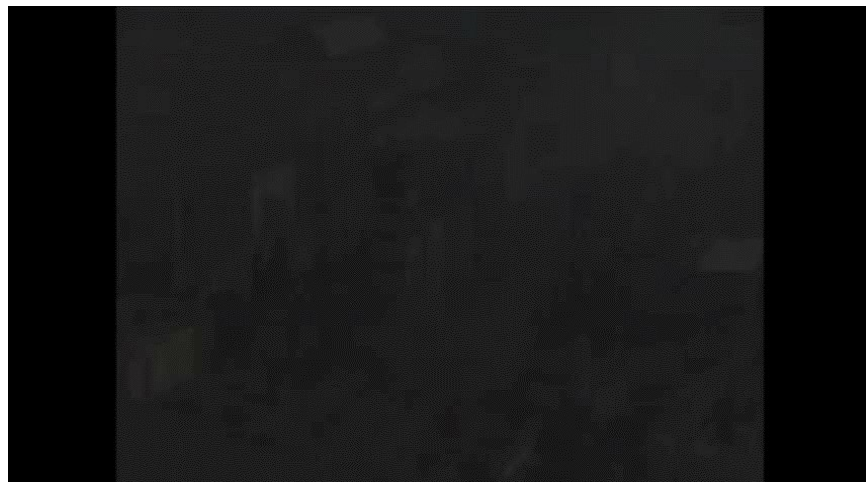
הפניית האדים למקום בטוח



סיכוני אבקות

35

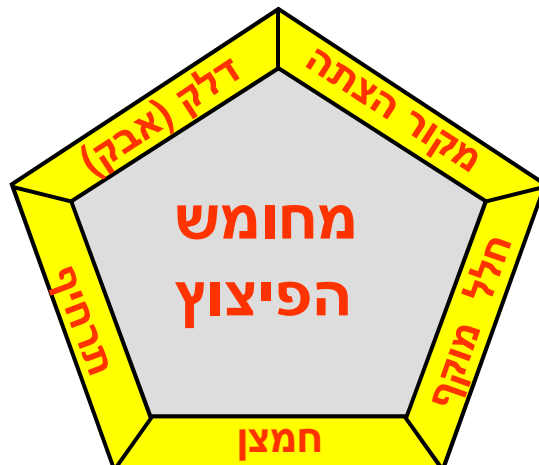
הסיכון הגלום באבקות



36

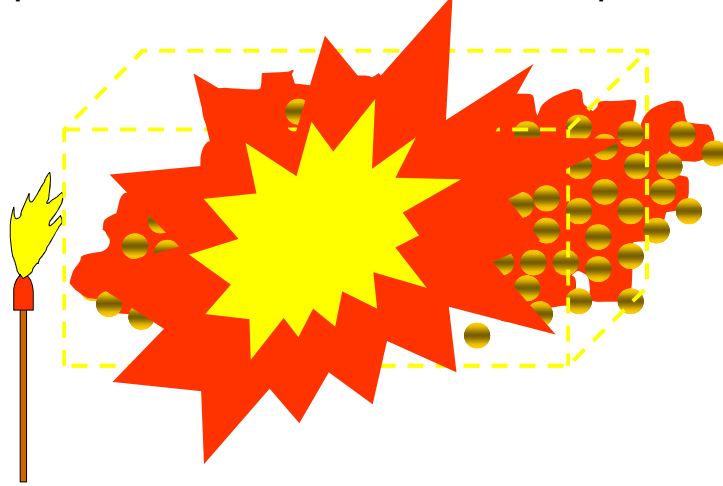
סיכוני חשמל סטטי בעבודה עם אבקות

37



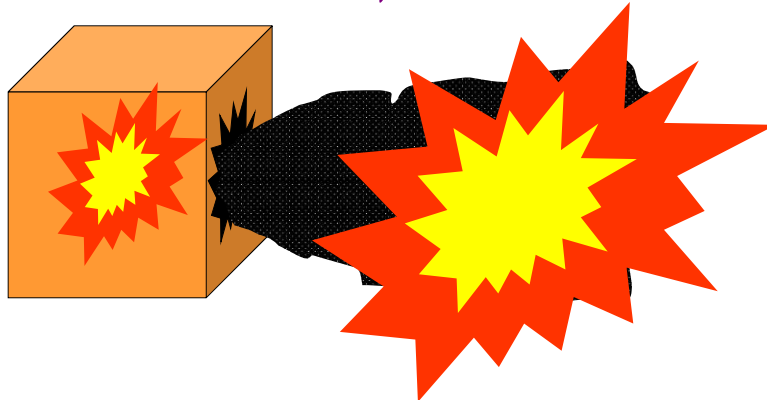
38

דפלגרציה - התקדמות חזית הלהבה נעה במהירות הנמוכה ממהירות הקול



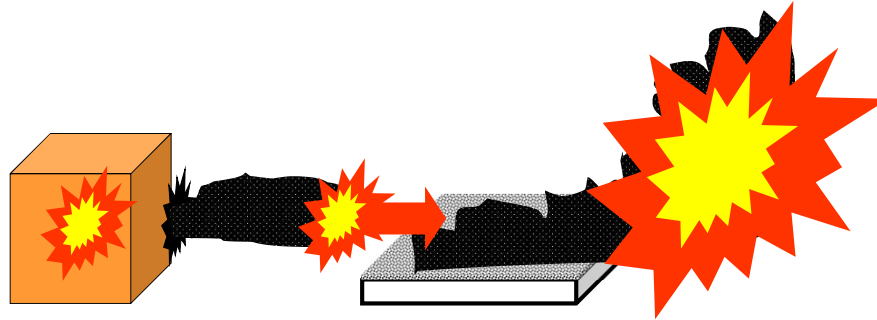
39

פיצוץ ראשוני



40

פיצוץ ראשוני מוביל לפיצוץ שניוני



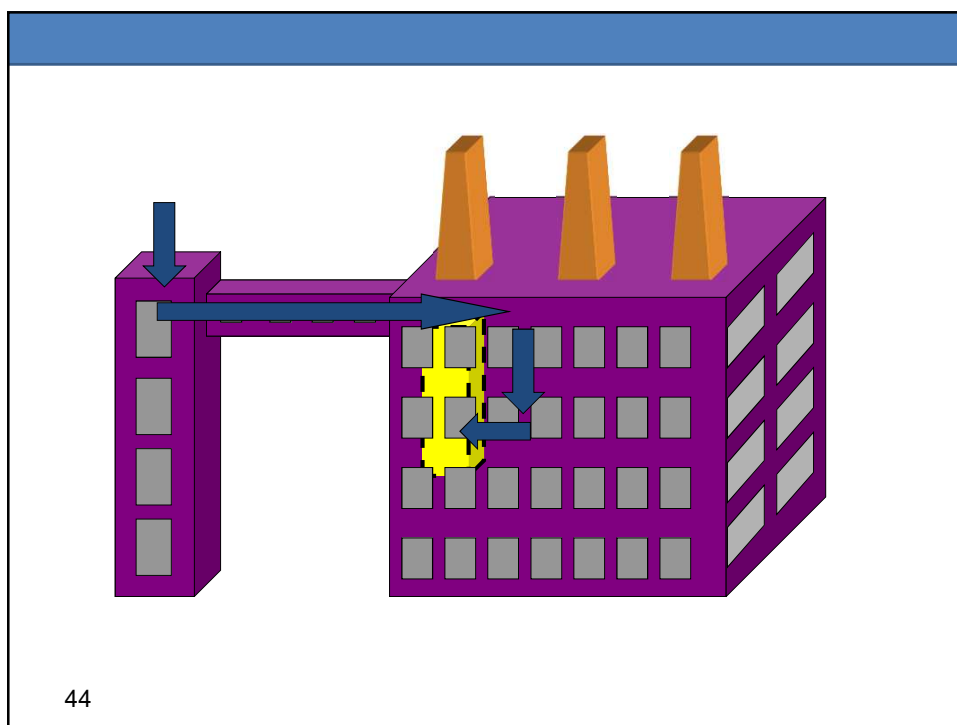
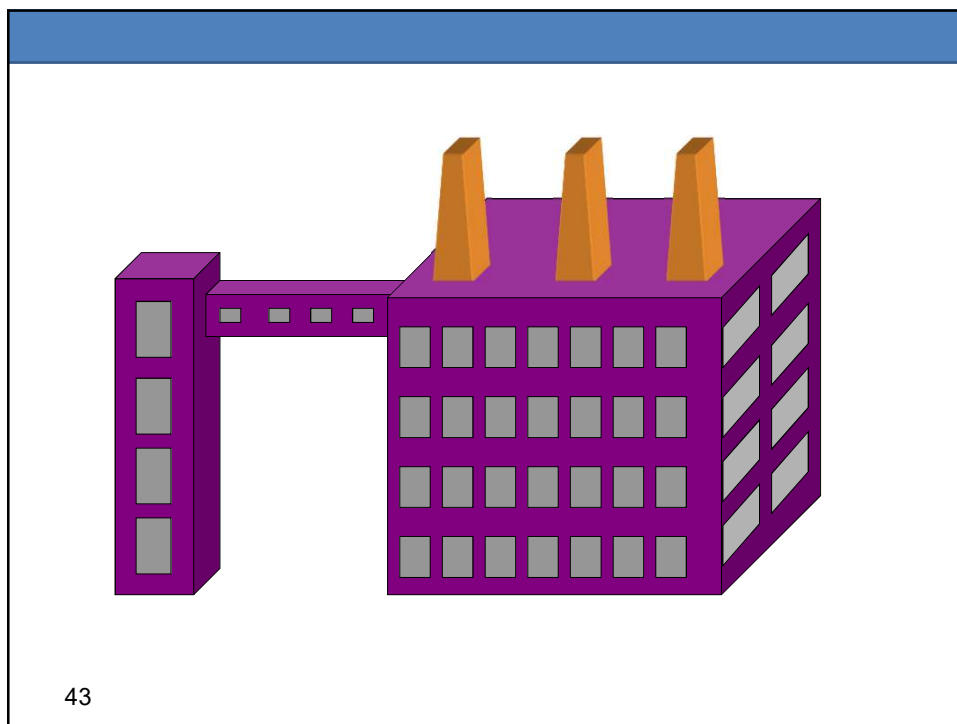
דוגמא להצטברות אבק דליק שתרמה לפיצוץ השניוני

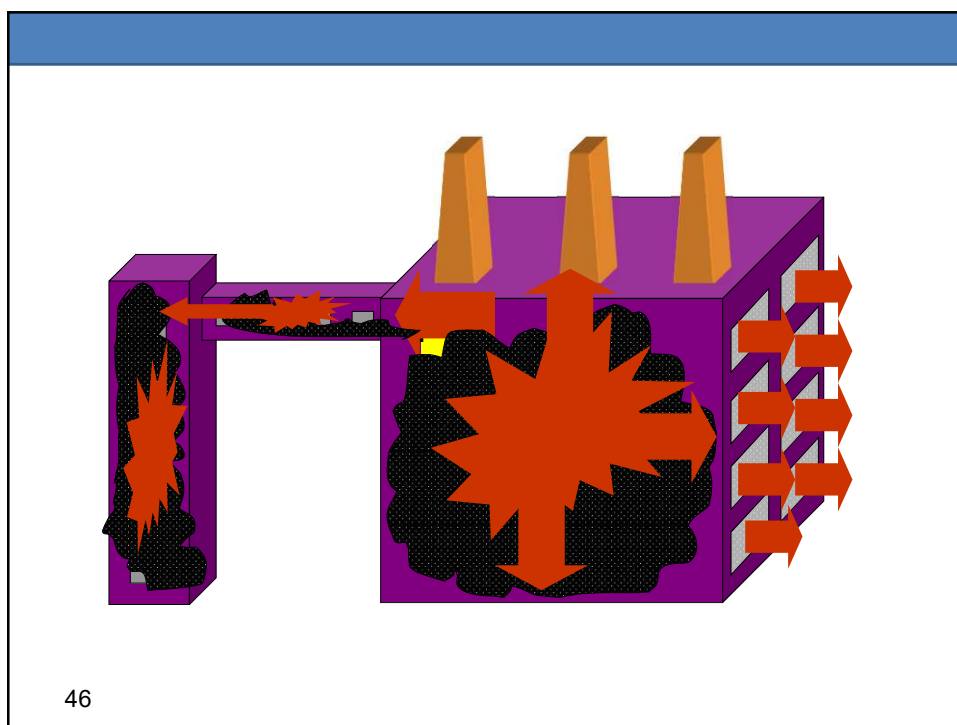
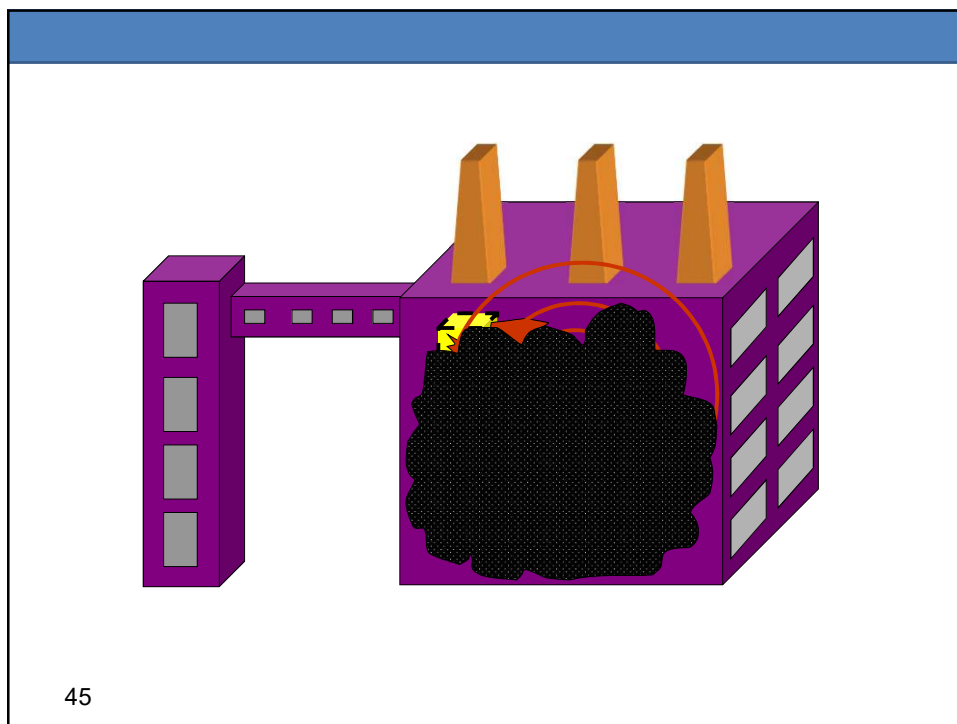


Figure 34. Dust accumulation on roof trusses.



נלקח מתוך דו"ח חקירת הפיצוץ ב- HAYES LEMMERZ INTERNATIONAL-HUNTINGTON, INC. אירוע בו נהרג אדם אחד ושישה נפצעו.



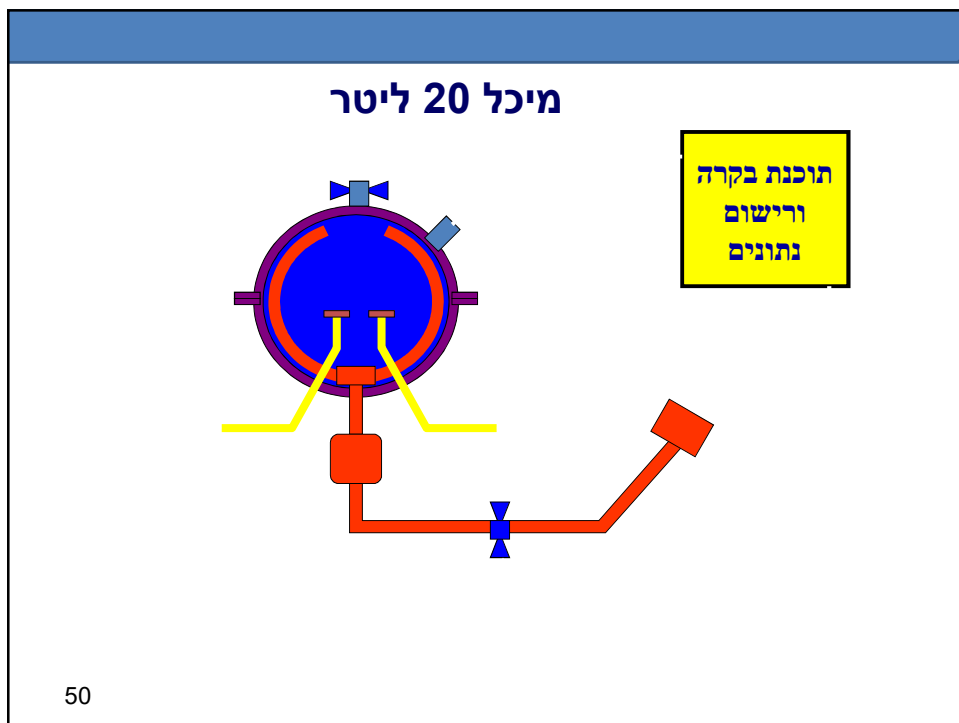
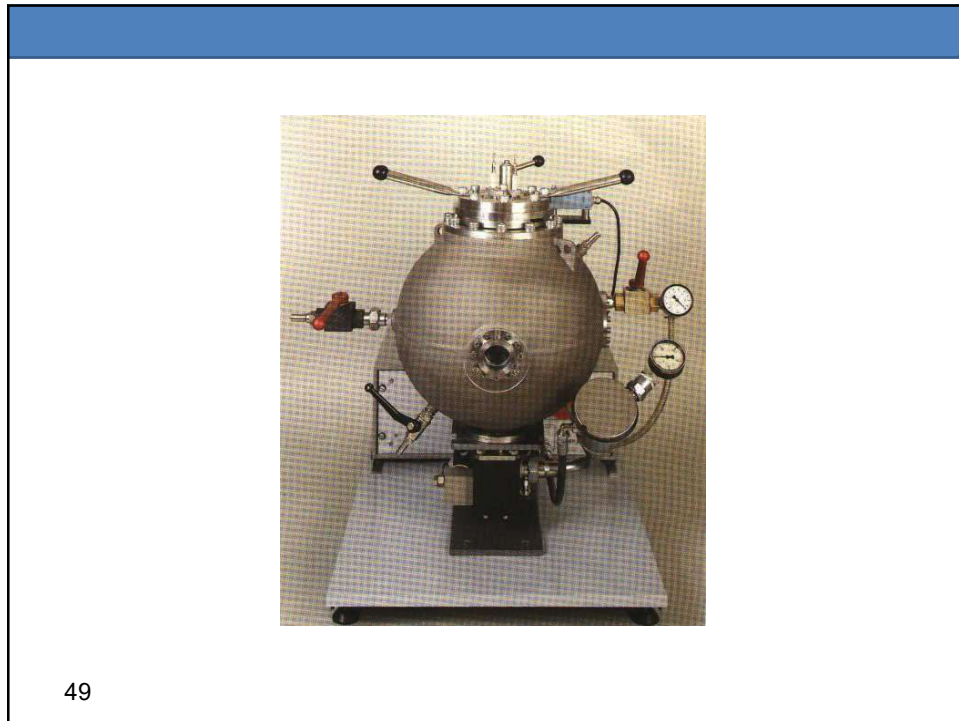


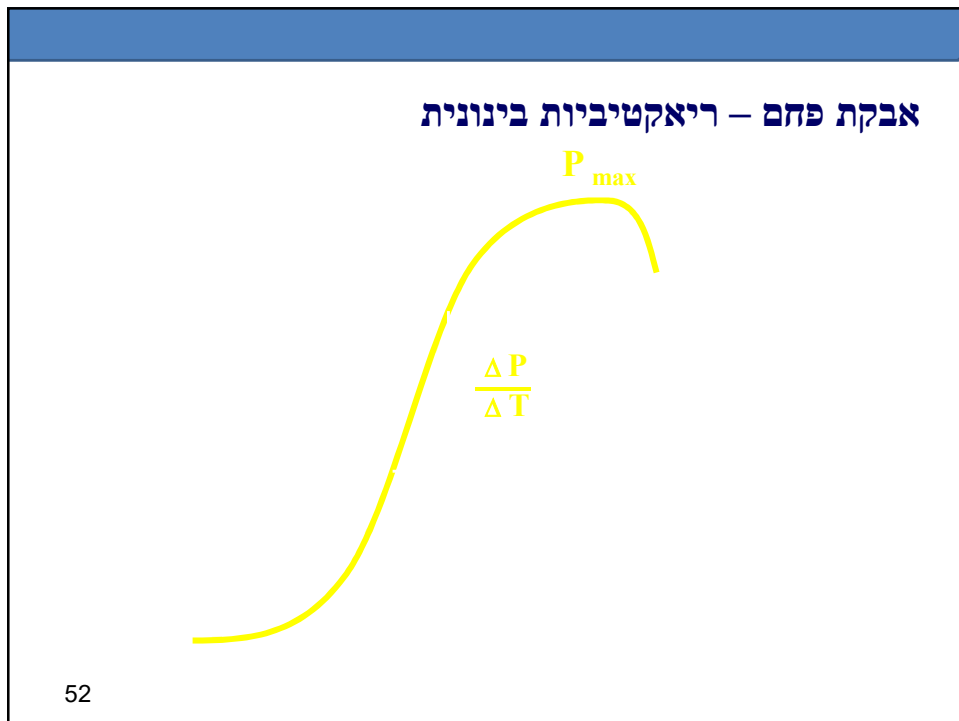
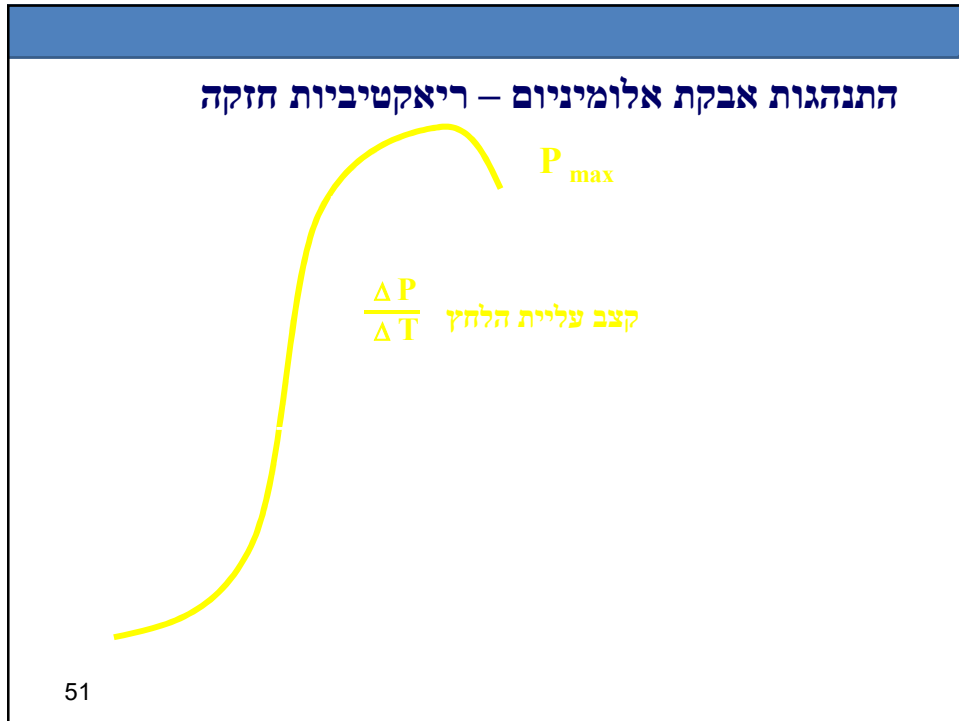
שיטות להקטנת המטען הסטטי

- הארקה וגישור
- הקטנת המטען סטטי ע"י הגדלת הלחות (ריכוז אדי המים)
- הקטנת מטען סטטי ע"י יוניזציה

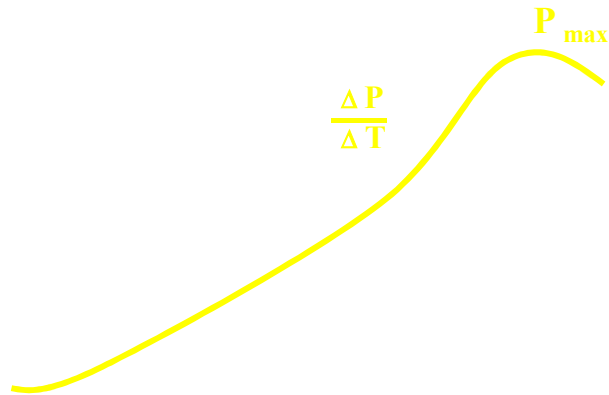
סיכון הפיצוץ נקבע על סמך הפרמטרים הבאים:

- גודל חלקיקים
- תכולת לחות
- קלות הצתה (MIE)
- מאפייני נפיצות (Kst)





ריאקטיביות נמוכה – אבקת חלב



53

חישוב (K_{ST})

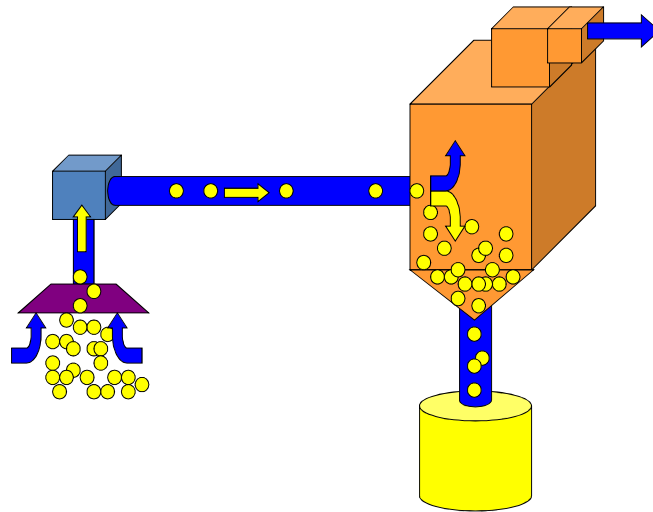
$$K_{ST} = \frac{\Delta P}{\Delta T} (V)^{1/3}$$

54

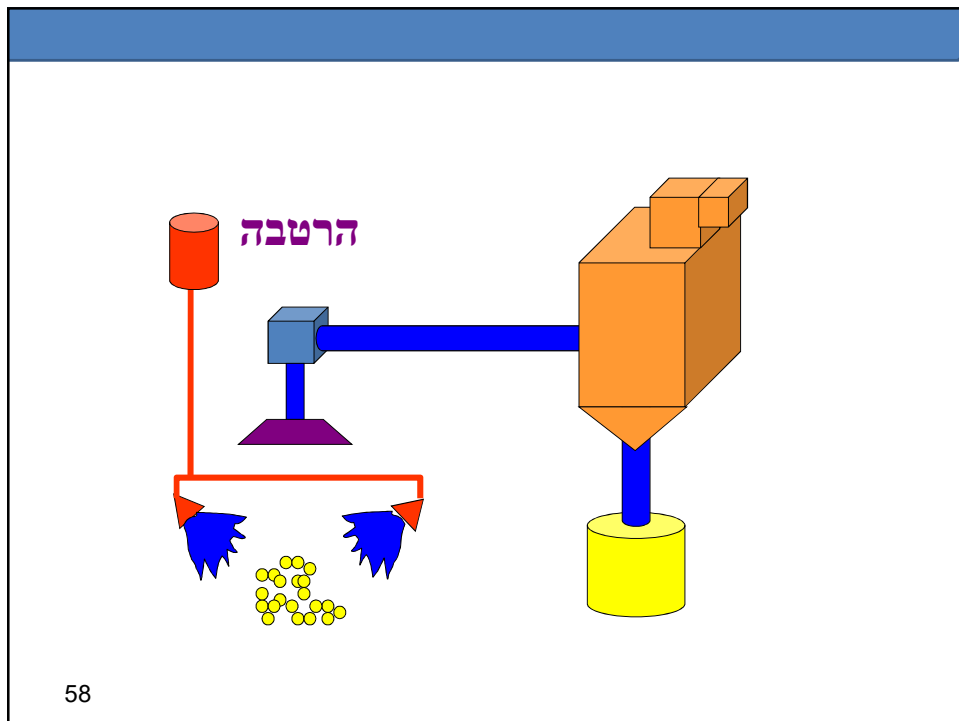
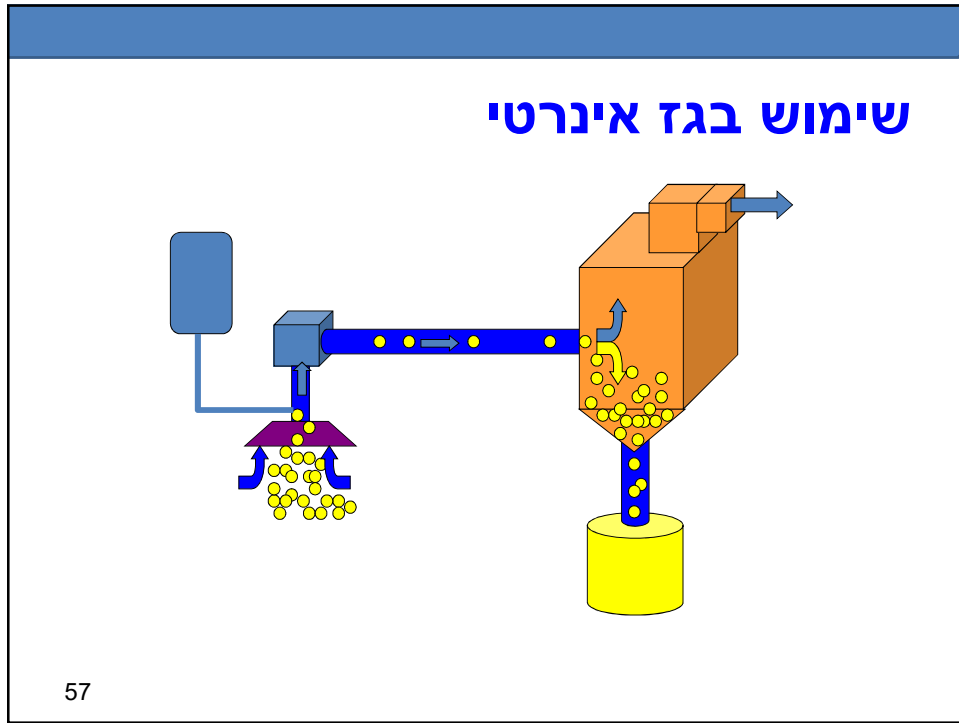
שיטות למניעת פיצוץ ציודים תהליכיים

55

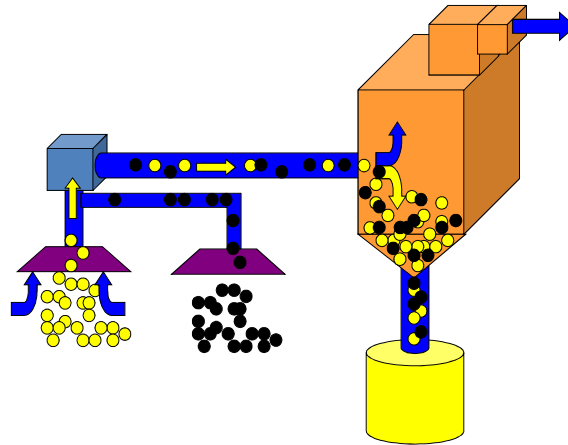
55



56

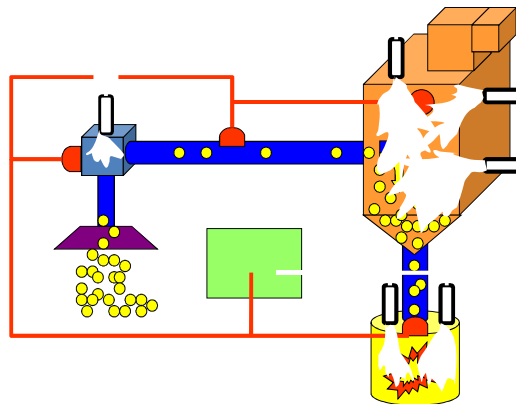


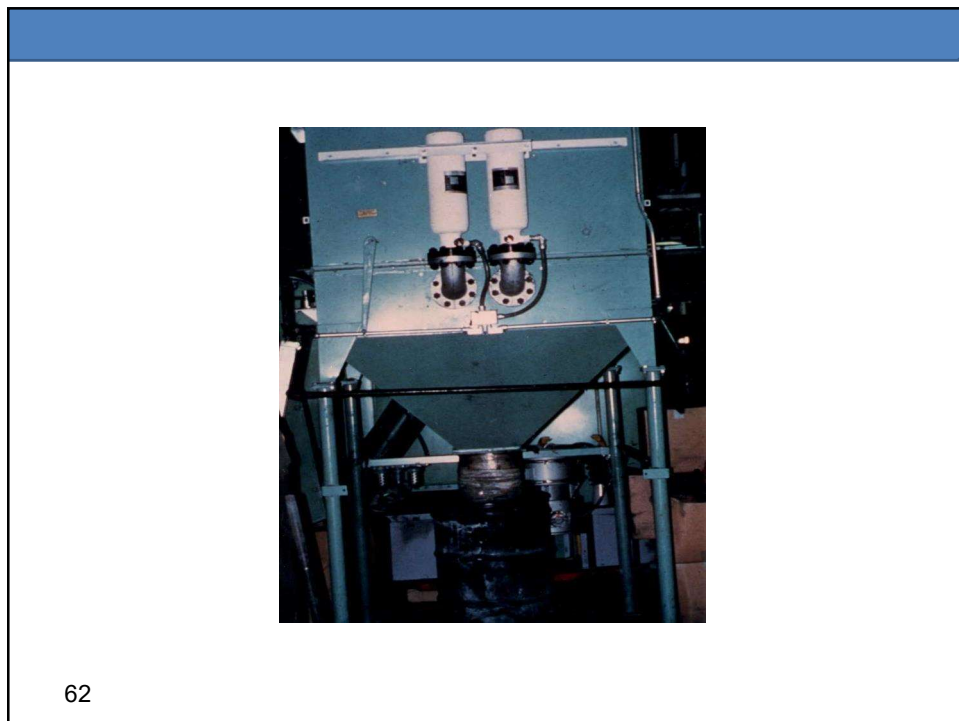
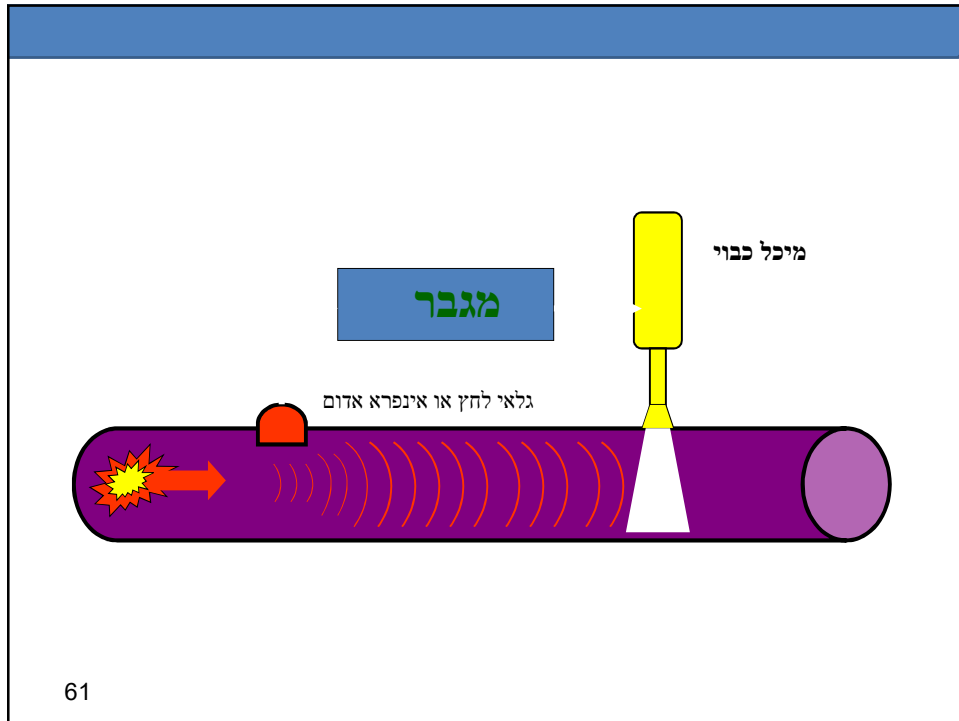
ערבוב עם חומר בלתי דליק

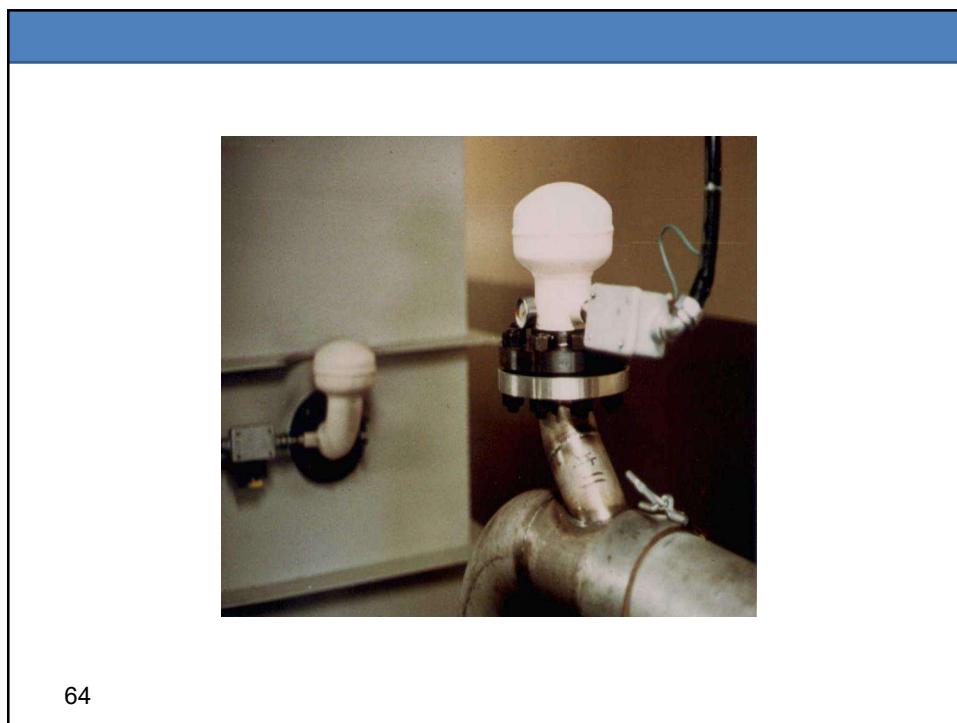
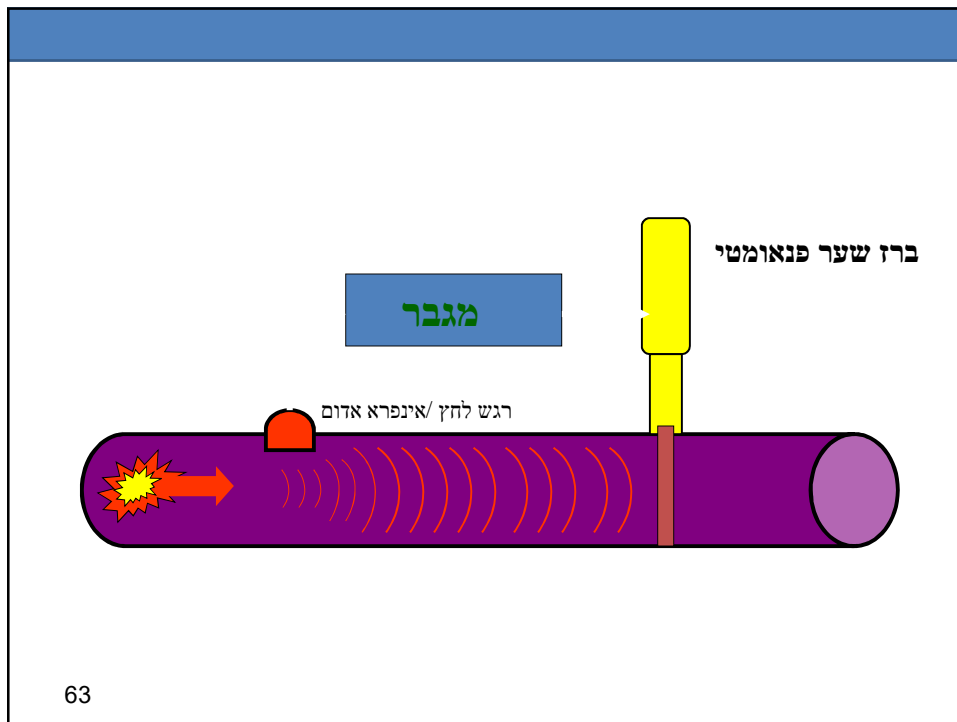


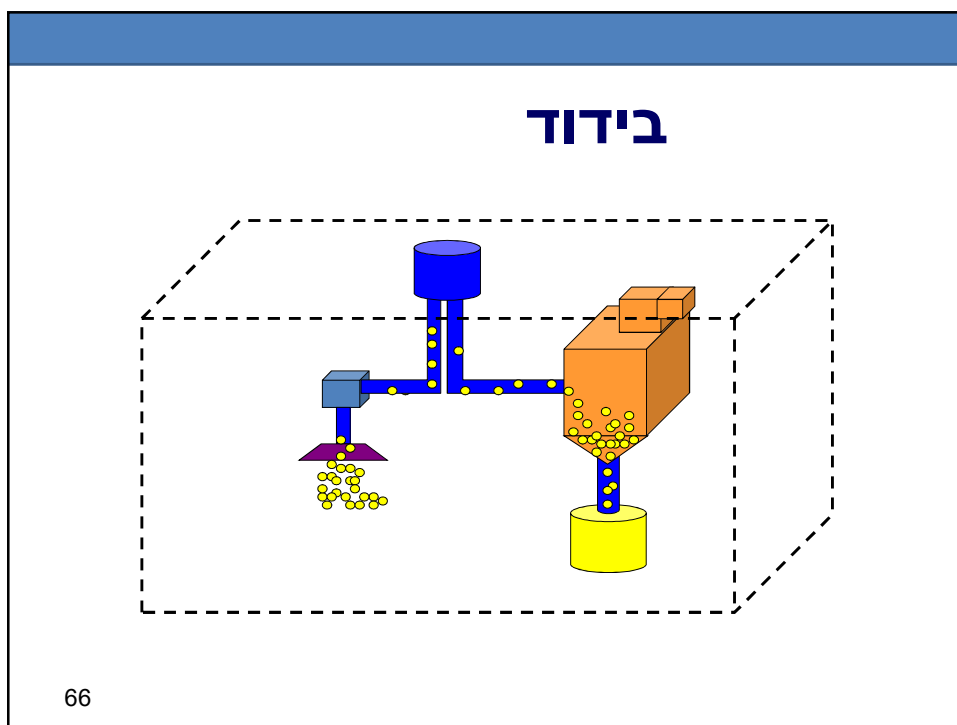
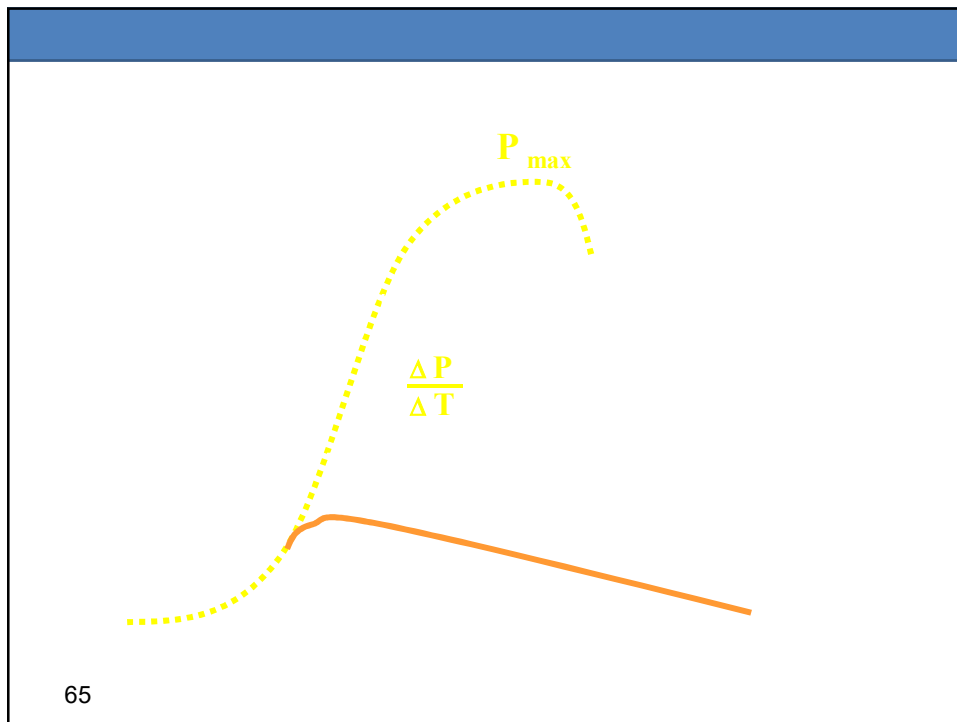
59

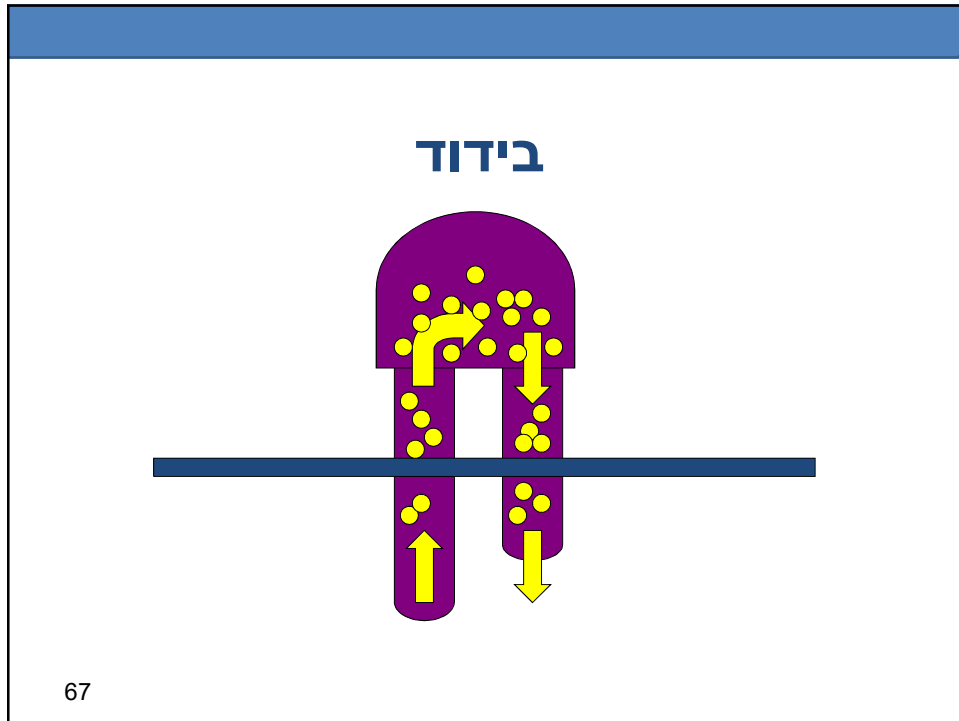
שימוש בכבוי מהיר



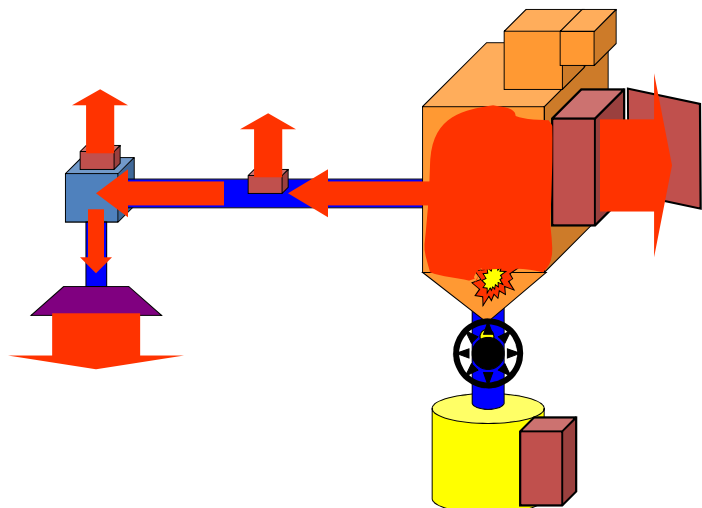








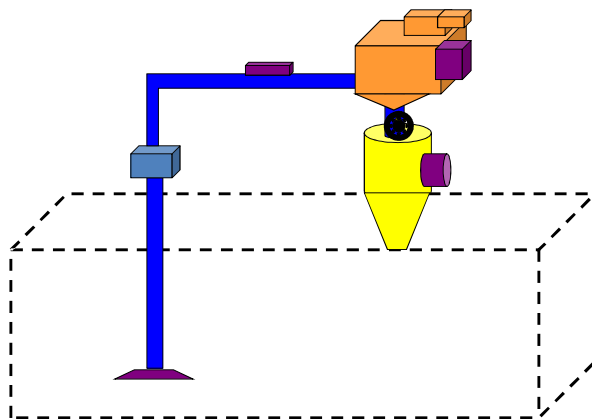
DLC= Damage Limiting Construction





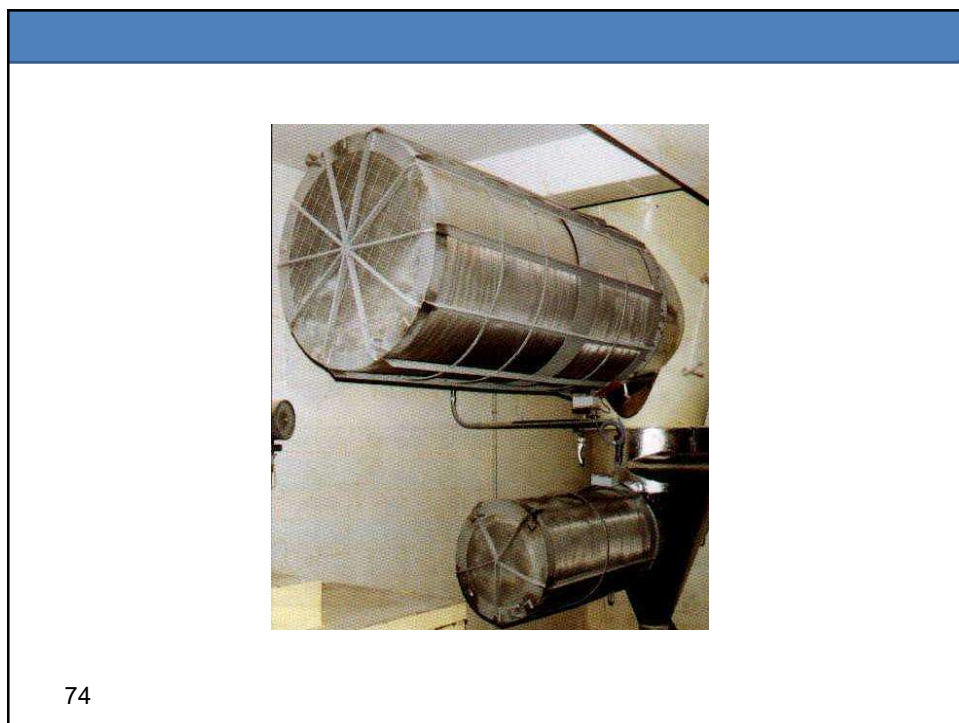
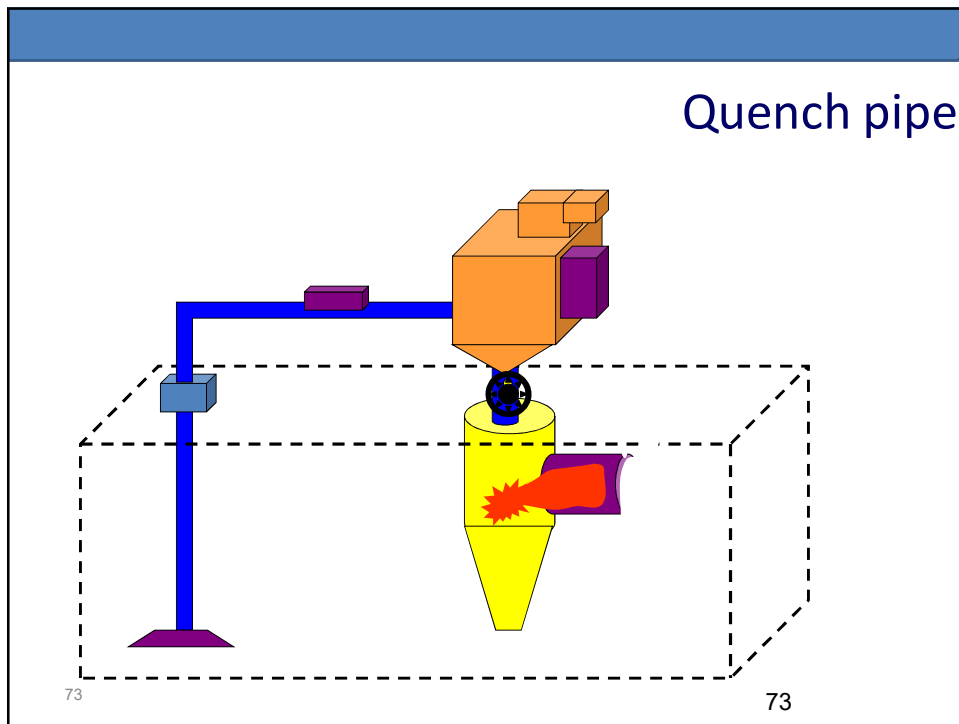
71

הוצאת יחידת הציוד אל מחוץ למבנה

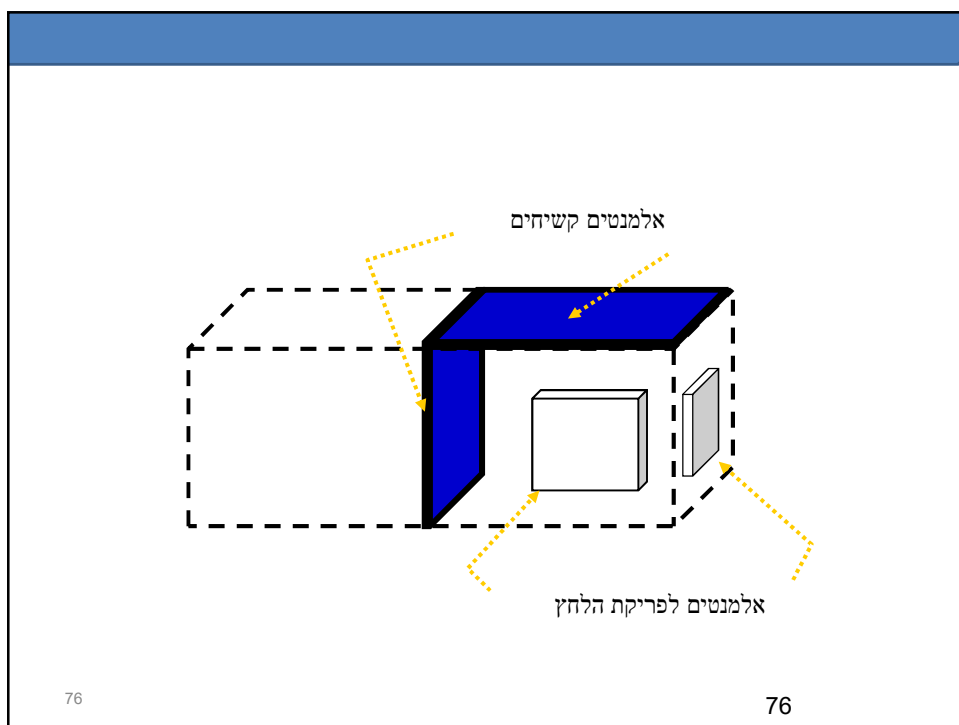
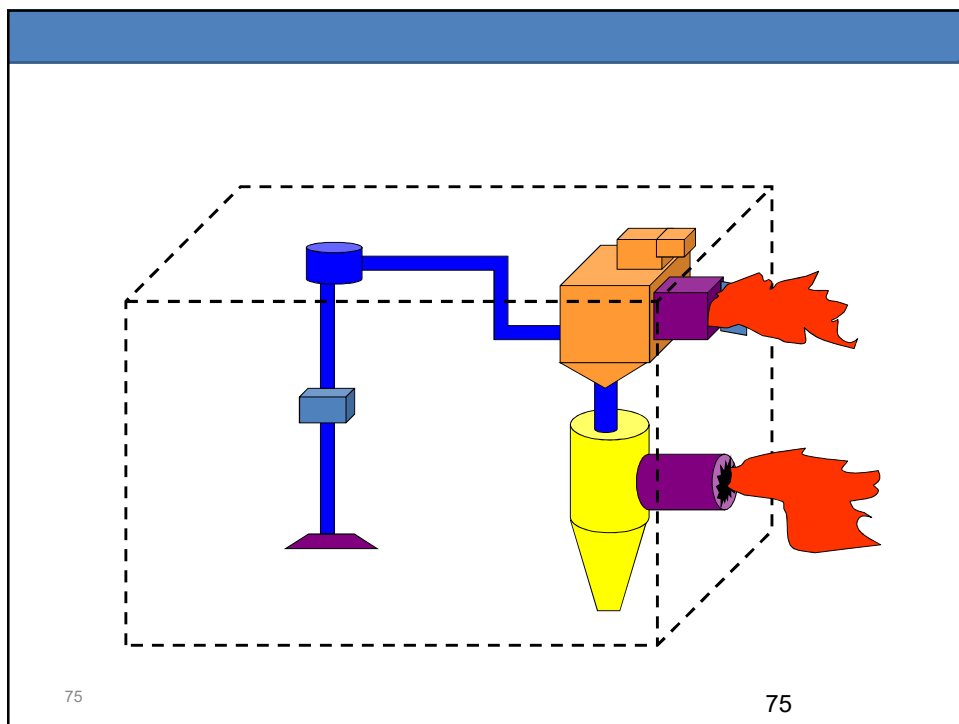


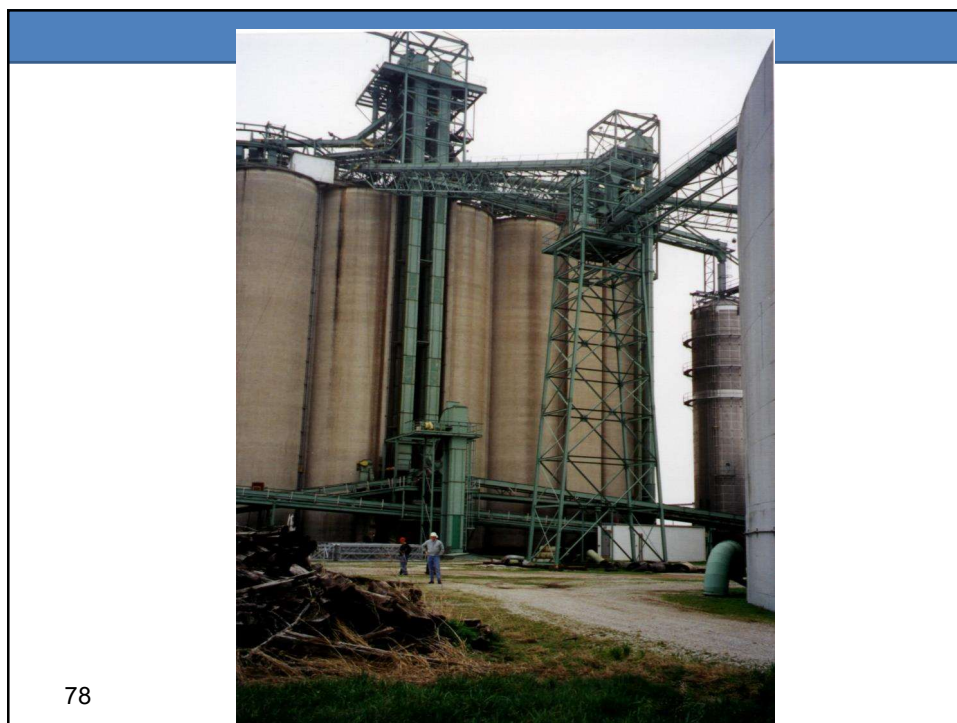
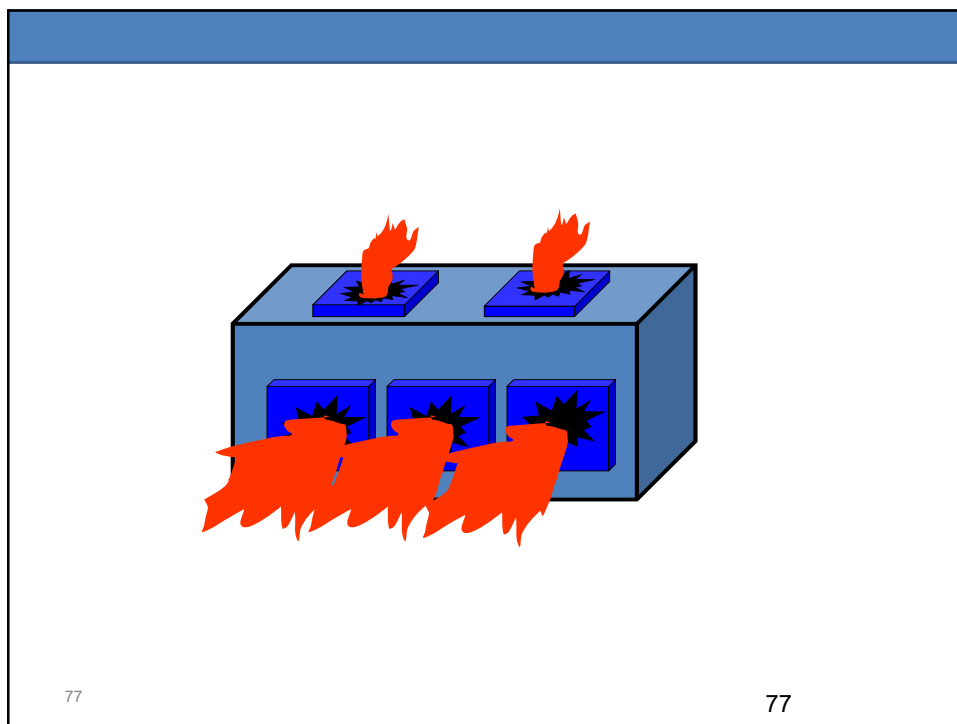
72

72



74







79

דוגמא להצטברות אבק דליק שתרמה לפיצוץ השניוני



Figure 34. Dust accumulation on roof trusses.



נלקח מתוך דו"ח חקירת הפיצוץ ב- HAYES LEMMERZ INTERNATIONAL-HUNTINGTON, INC. אירוע בו נהרג אדם אחד ושישה נפצעו.

