

מזעור סיכוני חשמל סטטי שנוצר במילוי וריקון נוזלים דליקים

השימוש ב"קוביות" - מיכלים ניידים העשויים מפוליאתילן (HDPE) שנפחם בד"כ כ-1000 ליטר לצורך איחסון ושינוע נוזלים שונים נפוץ מאוד בתעשייה בשל מחירם הזול והנחות התפעולית. עם זאת, הלקחים ממספר רב של שריפות שאירעו בארץ ובעולם, ממחישים את חשיבות הבנת הסיכונים וניהול הסיכונים הכרוכים בשימוש ב"קוביות" המכילות נוזלים דליקים

מאת שי שגב M.Sc

הכותב הוא מומחה לניתוח סיכונים תהליכיים וסיכוני אש



תמונה 1: קובייה מכילה נוזל

מנגנוני היווצרות פיצוץ ושריפה כתוצאה מפריקה אלקטרוסטטית

במהלך מילוי וריקון סולבנטים מקוביות- על מנת שיתרחש פיצוץ או תתפתח שריפה כתוצאה מפריקת חשמל סטטי יש צורך שיתרחשו 3 שלבים עוקבים: יצירת מיטען החשמל הסטטי, הצטברותו ופריקתו.

שלב א': יצירת המיטען

חשמל סטטי נוצר בעיקר ע"י חיכוך. דוגמאות לתהליכים בהם נוצר חשמל סטטי: זרימה של נוזל בצנרת; נפילת אבקה דרך משפך להזנת מוצקים (chute); הליכה של אדם (חיכוך הנעליים ברצפה); שינוע פניאומטי; פעולות להקטנת גודל חלקיקי אבקה - כגון טחינה ומיקרוניזציה; זרימה דו- פאזית

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.

בכדי למנוע את האפשרות להתממשות התרחיש הנ"ל, הדרך הבטוחה ביותר לעבודה עם נוזלים דליקים היא להשתמש במיכלים מתכתיים מוארקים. עם זאת, לעיתים קרובות, החלפה של כל הקוביות הקיימות במפעל אינה פתרון מעשי ולכן יש צורך לנקוט בכל האמצעים - הן למזעור ההסתברות להצתה של הנוזלים הדליקים בקובייה והן למניעת החמרה בהתפתחות האש במקרה ותתרחש הצתה כזו.

טעינה ופריקה יוצרים חשמל סטטי

מיטענים של חשמל סטטי נוצרים הן במהלך מילוי והן במהלך ריקון של נוזלים דליקים בקוביות. מיטענים אלה יכולים להצטבר על פני הנוזל וגם על מעטפת הפלסטיק של הקובייה. פריקה של מיטענים אלה (פריקה אלקטרוסטטית) עלולה לגרום להצתת אדי הנוזל הדליק הנמצאים בחלל הקובייה. פריקת חשמל סטטי היא אחת מגורמי ההצתה הנפוצים של נוזלים דליקים בקוביות.

מאחר ופריקת חשמל סטטי היא אחת מגורמי ההצתה הנפוצים של נוזלים דליקים בקוביות, עוסק מאמר זה בדרכים למזעור ההסתברות להתרחשותה. מטרת המאמר היא להמליץ על דרכים למזעור ההסתברות לפריקת חשמל סטטי במהלך מילוי וריקון של נוזלים דליקים, תוך התמקדות במילוי וריקון מ"קוביות".

זהירות כבר בעת האחסנה

"קובייה" (Intermediate Bulk Container) היא כלי קיבול שנפחו בד"כ 1000 ליטר (קיימות גם קוביות גדולות יותר בנפח של כ-2000 ליטר) העשויה ממעטפת פוליאתילן 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 ושפך הנוזל עלול 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

- זרימה של שני נוזלים בו זמנית; זרימה של גז ומוצק, של נוזל וגז וכד'.

ככל שנוצר יותר חיכוך בתהליך, קצב היווצרות החשמל הסטטי גבוה יותר. לדוגמה:

• צפיפות מיטען החשמל הסטטי הנוצר בצינור עולה פי 5 עם עליית מהירות הזרימה בצינור:

$$\rho_{\infty} \approx 5 v$$

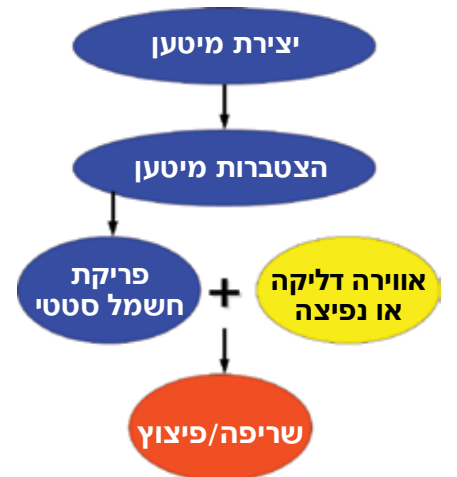
כאשר:

ρ_{∞} = צפיפות המיטען הנפחית, כלומר כמות המיטען הממוצעת ליחידת נפח של צינור ארוך (ביחידות של $\mu\text{C}/\text{m}^3$ - מיקרו קולון למ"ק)

v = המהירות הלינארית של הנוזל בצינור (ביחידות של מטר/שנייה).

• זרימה דרך מסנן (הן מתכתי והן מפלסטיק) יוצרת הרבה יותר מיטענים מאשר זרימה רגילה דרך צינור (קצב היווצרות המיטענים גדל בערך פי 5,000 כאשר יש מסנן בקו). אחת מהתאונות בהן נוצרה התבקעות של קובייה במהלך ריקונה, התרחשה כתוצאה מהצטברות מיטען גבוה על חבק ("בנד") מתכתי שהחזיק בד יוטה בקצה טובלן פלסטיק (בד היוטה שימש כמסנן מאולתר). זרימת הנוזל דרך בד היוטה גרמה להיווצרות מיטענים בקצב גבוה. מיטענים אלו הצטברו על גבי החבק המתכתי ובסופו של דבר גרמו לפריקת ניצוץ.

• מילוי בהתזה (splash filling) דרך הפתח העליון של קובייה או מיכל הוא תהליך שיוצר כמות גבוהה מאוד של מיטענים כתוצאה מהחיכוך של טיפות הנוזל עם האוויר והפירוק של זרם הנוזל לטיפות, וכן כתוצאה מחיכוך הנוזל על דופנות וקרקעית הקובייה.



תרשים 1: התנאים הנדרשים להיווצרות שריפה או פיצוץ כתוצאה מפריקת חשמל סטטי

שלב ב' - הצטברות המיטען

מיטען של חשמל סטטי יכול להצטבר בין היתר:

• **על גבי מתכת "צפה" (אביזרי מתכת שאינם מוארקים):** מיטען החשמל הסטטי שנוצר יכול להצטבר על גבי אביזרי מתכת במערכת, שאינם מוארקים ("מתכת צפה"), לדוגמה: ברז מתכתי, שאינו מוארק או מגושר, בצנרת העשויה מפלסטיק; אוגן מתכתי בצנרת מזכוכית וכד'. אביזרים אלה יכולים לצבור כמות גדולה מאוד של מיטענים ולשמש כקבל של מיטען חשמל סטטי. המיטען שהצטבר על המתכת הצפה (ה"קבל" של מיטען החשמל הסטטי) עלול להתפרק, תוך כדי יצירת ניצוץ כאשר יהיה בקרבתו גוף מוליך אחר הנמצא בפוטנציאל חשמלי אחר.

• **על גבי נוזלים:** את הנוזלים ניתן לחלק לשתי קבוצות שלהן מנגנוני פריקת חשמל סטטי (פא"ס - פריקה אלקטרוסטטית) שונים: נוזלים מוליכים ונוזלים מבודדים. **נוזלים מוליכים** הם נוזלים שלהם מיטענים חשמליים החופשיים לנוע והמוליכות החשמלית שלהם היא מעל $1,000 \text{ pS}/\text{m}$ (פיקו-סימנס למטר) לדוגמה: אתנול, מתנול, אצטון, אתיל אצטט, מים וכד'.

נוזלים מבודדים הם נוזלים שלהם אין מיטענים חשמליים החופשיים לנוע, כלומר: הם אינם מוליכים חשמל, והמוליכות החשמלית שלהם נמוכה מ- $1,000 \text{ pS}/\text{m}$ (פיקו-סימנס למטר) לדוגמה: טולואן, קסילן, בנזן וכד'.

הצטברות מיטען חשמל סטטי על גבי נוזלים מוליכים - כאשר נוזלים מוליכים זורמים במערכת שאינה מוארקת (לדוגמה: בתוך צנרת עשויה מפלסטיק או זכוכית או בתוך מיכלי פלסטיק או זכוכית), מיטעני החשמל הסטטי אינם יכולים להתפרק דרך הארקה ולכן יצטברו בנוזל. כתוצאה מכך קיים סיכון גבוה לפריקת חשמל סטטי מהנוזל במנגנון של פריקת ניצוץ (spark discharge) כפי שיוסבר בהמשך.

הצטברות מיטען חשמל סטטי על גבי נוזלים מבודדים (נוזלים שאינם מוליכים) - מאחר ונוזלים מבודדים אינם יכולים לפרוק את מיטען החשמל הסטטי שנוצר והצטבר בהם כתוצאה מהזרימה, מיטעני החשמל הסטטי יישארו בתוך נוזלים מבודדים גם אם המערכת בה הם מוזרמים מוארקת ומגושרת לכלל אורכה.

כתוצאה מכך קיים סיכון גבוה לפריקת חשמל סטטי מהנוזל במנגנון של פריקת מברשת (brush discharge) כפי שיוסבר בהמשך.

ככל שהזמן הנדרש להתפרקות מיטען החשמל הסטטי (Relaxation time) ארוך יותר, גדלה הסבירות שתתרחש פריקה הגורמת להצתה, מכיוון שהחומר נשאר טעון במשך זמן ארוך יותר.

בעבודה עם חומרים בעלי מוליכות נמוכה (חומרים מבודדים) יש לבצע ניתוח סיכונים מקיף על מנת לוודא שלא קיימים התנאים להיווצרות פריקת מברשת (ראו הסבר בהמשך).

שלב ג' - פריקת מיטען החשמל הסטטי:

ישנם שני מנגנונים מרכזיים לפריקת חשמל סטטי בנוזלים: פריקת ניצוץ (Spark Discharge) שהיא הפריקה המוליכים, ופריקת מברשת (Brush Discharge) שהיא הפריקה הנפוצה ביותר בעבודה עם נוזלים מבודדים.

בעוד שגישור/הארקה הוא אמצעי בטיחות מרכזי למניעת פריקת ניצוץ, כאשר הפריקה מתרחשת בנוזלים מבודדים היא יכולה לגרום, בסיטואציות מסוימות, לפריקת חשמל סטטי וכתוצאה מכך לפיצוץ או שריפה.

מנגנון פריקת חשמל סטטי בנוזלים מוליכים - פריקת ניצוץ (Spark Discharge):

מנגנון פריקת חשמל הסטטי הנפוץ ביותר בנוזלים מוליכים הוא מנגנון של "פריקת ניצוץ" בו הפריקה מתרחשת כתוצאה מהפרש פוטנציאלים, קרי: הפרש מיטענים בין שני גופים מוליכים. פריקה זו מתרחשת בעוצמה של עד 100 mJ , כתוצאה מפריקת מיטען סטטי שהצטבר על גוף מוליך בלתי מוארק ולכן ניתנת למניעה בעזרת גישורים והארקות. בדיקת תקינות ההארקות צריכה להתבצע עם התקנתן (כחלק מתהליך קבלת הפרויקט) ובתדירות של לפחות אחת לשנה לאחר מכן. את בדיקת ההארקה יכול לבצע כל חשמלאי בעזרת מכשיר ייעודי לכך - מד התנגדות חשמלי ('המגר').

הארקה נחשבת כתקינה אם ההתנגדות המרבית של אלמנטים מתכתיים אינה עולה על 10Ω כלפי אלקטרודת הארקה (אדמה). ההתנגדות המרבית המותרת של אלמנטים מתכתיים היא $1 \text{ M}\Omega$,

שם הנוזל	מוליכות אופיינית (pS/m)	זמן אופייני, בשניות, הנדרש להתפרקות מיטען החשמל הסטטי - Relaxation time
מוליכות נמוכה		
חומרים ארומטיים (בנזן, טולואן, קסילן וכד')	0.1-50	0.4-200
בנזן	0.1-100	0.2-200
דס"ל (דלק סילוני קרוסין)	0.1-50	0.4-200
סולר	1-100	0.2-20
שמני סיכה	0.01-1,000	0.02-2,000
מוליכות בינונית		
דלקים ושמנים המכילים תוספים מוליכים	50-1,000	0.02-0.4
מזוט / ביטומן	50-100,000	$2 \cdot 10^{-4}$ -0.4
אסטרים (esters)	100-1,000,000	$2 \cdot 10^{-5}$ -0.2
מוליכות גבוהה		
נפט גולמי	>1,000	<0.02
חומרים אלכוהוליים	10^6 - 10^8	$2 \cdot 10^{-7}$ - $2 \cdot 10^{-5}$
חומרים קטונים (Ketones)	10^5 - 10^8	$2 \cdot 10^{-7}$ - $2 \cdot 10^{-4}$
מים מזוקקים	$5 \cdot 10^6$	10^{-6}
מים (לא מזוקקים)	$\geq 10^8$	$< 2 \cdot 10^{-7}$

- עלול להוות סיכון לפריקת חשמל סטטי ולהצתה שתגרום לפיצוץ ו/או לשריפה. פריקה זו מתרחשת בעוצמה של עד 4mJ (עוצמה המספיקה בכדי להצית את רוב אדי הסולבנטים). **חשוב לזכור: לא ניתן למנוע את פריקת המברשת בעזרת גישורים והארקות.**

המלצות רלבנטיות של ת"י 60079 חלק 32 "אטמוספירות נפיצות - סיכוני חשמל סטטי"

(תקן זה זהה לתקן IEC 60079):

✓ מומלץ להימנע מעבודה בקוביות עם נוזלים דליקים מבודדים בעלי התנגדות הגבוהה מ- 10^8 אוהם/מטר, מאחר וחומרים אלה יכולים לצבור כמות גבוהה של מיטענים וכתוצאה מכך לא ניתן למנוע את האפשרות להיווצרות פריקת מברשת (סעיף 9.5.2 בתקן).

✓ אין להשתמש בקוביות עבור נוזלים בעלי אנרגיית הצתה מינימלית, MIE, של 0.20mJ (מילי ג'אול) או פחות, מכיוון שהסבירות שנוזלים אלה יוצתו כתוצאה מפריקת חשמל סטטי היא גבוהה.

✓ כאשר נעשה שימוש בטובלן פלסטיק, מיטענים של חשמל סטטי יכולים להצטבר בחלקו הפנימי של הטובלן. כמות המיטען 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- $10^8 \Omega \cdot \text{m}$ (טובלנים המוגדרים ע"י היצרן כ-dissipative מקיימים דרישה זו).

✓ יש להשתמש בטובלן בעת מילוי קוביות. במידה ולא ניתן להשתמש בטובלן יש לוודא שמהירות הזרימה נמוכה מ-1 מטר/שנייה.

לבין גוף מוליך מוארק, שנמצא סמוך לפני הנוזל. לדוגמה: אם נקרב טובלן מתכתי לפני השטח של נוזל טעון, כגון טולואן, עלולה להתרחש הצתה כתוצאה מפריקת מברשת. לכן, בעבודה עם נוזלים מבודדים, השימוש בגופים מתכתיים מוארקים - לרבות מוטות דיגום מתכתיים, טובלנים מתכתיים וכד'

תרשים 2: מנגנון היווצרות פריקת מברשת (פריקה מפני השטח של נוזל מבודד לגוף מוליך מוארק)



תמונה 2: טובלן מתכתי המשמש למילוי קובייה



אולם מבחינה מעשית התנגדות של מעל 10Ω מצביעה על כשל בהארקה, כתוצאה לדוגמה מקורוזיה, מגעים רופפים וכד', שיש צורך לתקן.

לדוגמה, בכדי לבדוק הארקה של מערכת למילוי קוביות בעזרת טובלן מתכתי, יש לבדוק בעזרת מד ההתנגדות החשמלי (מכשיר המגר) את ההתנגדות בין קצה הטובלן המתכתי לאדמה. אם ההתנגדות הנמדדת היא מעל 10Ω , קיים כשל בהארקה.

מנגנון פריקת חשמל סטטי בנוזלים מבודדים - פריקת מברשת (Brush Discharge):

בנוזלים מבודדים כדוגמת טולואן, הקסאן, הפטאן וכד', המיטענים החשמליים אינם חופשיים לנוע ולכן - שימוש בגישור ובהארקה לא יבטיח את פריקת המיטען מהנוזל באופן בטוח. בנוסף לכך, בשונה ממנגנון פריקת החשמל הסטטי בנוזלים מוליכים ("פריקת ניצוץ") הנגרמת בשל הפרש פוטנציאליים בין שתי נקודות הנמצאות על גופים מוליכים שונים, מנגנון פריקת החשמל הסטטי בנוזלים מבודדים נגרם ע"י שדה חשמלי בין פני הנוזל הטעון

טבלה 2: מטריצה לקבלת החלטה לגבי חומרי המבנה המומלצים של טובלנים בעבודה עם קוביות:

העמדה	סוג הטובלן המומלץ
עמדה בה נעשה מילוי / ריקון של נוזלים מוליכים בלבד	טובלן מתכתי מוארק, כלומר טובלן מתכתי עם רציפות חשמלית לצינור הגמיש (שגם עליו להיות עשוי מחומר שמוליך מיטען חשמלי) ולמשאבה.
עמדה בה נעשה מילוי / ריקון של נוזלים מבודדים בלבד	טובלן עשוי מחומר מבודד כגון פלסטיק. רצוי שחומר המבנה של הטובלן יהיה מסוג dissipative - כלומר שהתנגדותו הנפחית תהיה פחות מ- $10^8 \Omega m \times 100$ מגה אוהם למטר)
עמדה רב תכליתית בה נעשה מילוי ו/או ריקון הן של נוזלים מבודדים והן של נוזלים מוליכים	טובלן עשוי מחומר מבודד כגון פלסטיק. רצוי שחומר המבנה של הטובלן יהיה מסוג dissipative - כלומר שהתנגדותו הנפחית תהיה פחות מ- $10^8 \Omega m \times 100$ (מגה אוהם למטר).

✓ המילוי והריקון של קוביות ייעשו במקום בו קיים ניקוז מסודר (למניעת הצטברות שפך של סולבנט במקרה של תקלה. ■

סימוכין ומקורות מומלצים לקריאה נוספת:

1. ת"י 60079 חלק 32 - אטמוספרות נפיצות: סיכוני חשמל סטטי
2. Cenelec Technical Report CLC/TR 50504: Electrostatics - code of practice for the avoidance of hazards due to static electricity, 2003
3. NFPA 77, 2014 Edition, Recommended Practice on Static Electricity
4. Fire performance of composite IBCs, Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive, 2007: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr564.pdf>
5. United Nations, Recommendations on the transport of dangerous goods, 16th revised edition, 2009 Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive, 2007: <http://www.hse.gov.uk/research/rrpdf/rr564.pdf>
6. United Nations, Recommendations on the transport of dangerous goods, 16th revised edition, 2009

(Safety Executive), הראו שהצתת הברז באמצעות מצת פשוט הביא להתכתו של הברז ולשפך תכולת הקובייה תוך כשתי דקות!

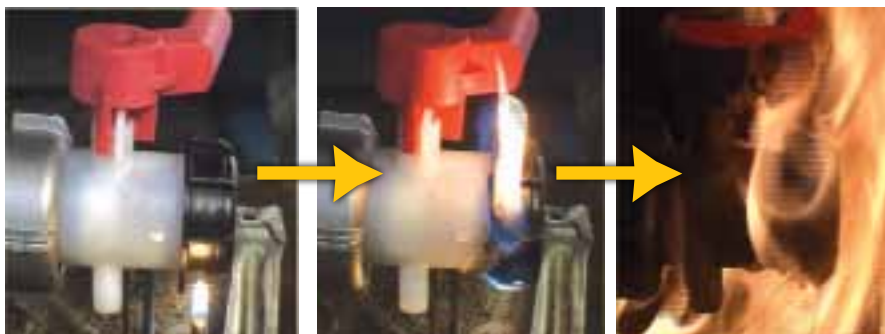
✓ לפני כל שימוש בקובייה יש לחבר את המסגרת המתכתית של הקובייה להארקה, מאחר וחיבור זה מסיט את המיטענים הסטטיים בנוזל אל הדפנות ומסייע למנוע פריקה אלקטרוסטטית אל הטובלן או ממנו אל הנוזל.

✓ בעבודה עם נוזלים מוליכים יש לוודא ויזואלית את הרציפות החשמלית (כלומר: לוודא היעדר מתכות צפות במערכת).

✓ העבודה תתבצע כאשר מישטח העבודה - הן המישטח עליו יעמוד העובד והן המישטח שעליו תמצא הקובייה - הם מוליכים. לדוגמה: מומלץ שהעבודה תתבצע על מישטח מבטון (שהוא חומר מוליך) ולא על מישטח אספלט (שהוא חומר מבודד).

✓ המפעיל המבצע את המילוי / הריקון של הקובייה יהיה מצויד במשקפי "גוגלס" או במגן פנים סגור הרמטית, למניעת התזה של החומר לעיניים, בביגוד אנטיסטטי (ביגוד המכיל 35% כותנה לפחות). ובנעלי עבודה עם סוליה אנטיסטטית.

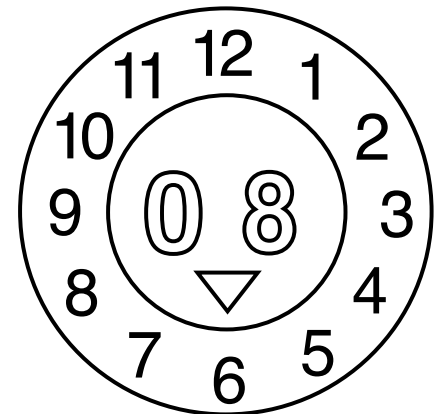
תמונה 5: תמונות מתוך ניסוי ה-HSE



המלצות בטיחות נוספות לעבודה עם קוביות

✓ לפני הכנסת נוזל לקובייה יש לוודא שהיא ריקה לחלוטין. בד"כ הקובייה צריכה להיות גם שטופה. על מנת שלא לערבב נוזלים שונים - ולמנוע סכנת ריאקציה כימית בלתי רצויה בין החומרים וסכנה לפליטת גזים רעילים. וכן על מנת שלא תהיה אווירה נפיצה בקובייה לפני תחילת המילוי. כמו כן, יש לוודא שלא פג התוקף של הקובייה - משך חייה המומלץ של קובייה הוא שנתיים וחצי מתאריך הייצור, המוטבע על חלקה העליון של כל קובייה.

הערה: ניתן להאריך את תוקף הקובייה בשנתיים וחצי נוספות אם בודקים אותה בהתאם להנחיות UN או DOT-57. הנחיות הבדיקות הללו דורשות, בין השאר, גם ביצוע בדיקות לחץ ולכן הן אינן מתבצעות במרבית המפעלים.



תמונה 3: תאריך ייצור הקובייה מוטבע על חלקה העליון (בדוגמה זאת הקובייה יוצרה ביוני 2008)



תמונה 4: קובייה שפג תוקפה - מעטפת הפלסטיק של הקובייה הופכת להיות שבירה

✓ נקודת התורפה של הקובייה היא הברז הממוקם בתחתיתה (מאחר והברז אינו במגע עם הנוזל, במקרה של אש בקרבתו הוא יידלק בקלות).

✓ ניסויים שנערכו ע"י מינהל הבטיחות והבריאות הבריטי, ה-HSE (Health and