

מבוא לתופעות קרינת חום Radiant Heat

עבור עמותת : Gas-Out

כתב וערך אבי ברילנט

מהנדס מחקר

Senior Member IEEE

נושאי הדיון

- מטרה
- הגדרות
- הגדרות התקן הבינלאומי
- כוויות
- מודלים מתמטיים
 - פילוג גאוסי
 - פונקציית פרוביט
- רמות קרינה
- תוצאות מחקרים לסיכונים
- תהליך ייצירת בריכת אש מאוניית LNG
- דליפה מאוניה
- דיון
 - האם יש בארץ תקן?
 - מודל התכנון לנקודת חדרה

מטרה

- להביא את כלל אנשי מטה המאבק להכרה והבנה בסיסית של מונחים בשיערוך סכנות מקרינת חום
- להציג מונחים יסודיים ומשמעותם
- להציג בפני מטה המאבק את התקנים ודרישות הבטיחות למינעת מקרה מוות כתוצאה מקרינת חום של גז מונזל

הגדרות

• שטף הספק

- הספק הוא אנרגיה ליחידת זמן
- שטף הספק הנו מדד צפיפות הספק ליחידת שטח
- יחידות נמדדות הן:
 - KW/m^2
 - $BTU/(h \cdot ft^2)$
 - $KCal/(h \cdot m^2)$
 - $KJ/(h \cdot m^2)$
- דוגמא למעברים בין יחידות:

W/m^2	$BTU/(h \cdot ft^2)$	$KCal/(h \cdot m^2)$
3.1525	1	2.7107
1	0.3172	0.85984
1.163	0.3689	1

הגדרות

• שטף הספק מגוף קורן

- כאשר דנים בגוף קורן חום דנים בצפיפות הספק שהוא פולט לסביבה
- כמות החום תלויה בסוג הדלק ונצילות הבעירה שלו
- מודל התפשטות החום הוא בספירה כדורית
- מסקנה 1: ככל שנתרחק ממקור הקורן הספירה הכדורית תגדל
- מסקנה 2: מאחר וכמות האנרגיה וההספק של המקור הקורן סופית, צפיפות ההספק תרד כתלות במרחק
- עוצמת הקרינה יורדת כתלות במרחק
- לחוק הזה קוראים חוק גאוס והוא ישים במקרים פיזיקאליים רבים
- האם יש גורמים נוספים שמנחיתים את קרינת החום ?
- שקיפות התווך (אוויר) הפסדי בליעה , מקדמי החזרה, אורך גל בננומטרים
- מכשולים בדרך שבולעים חום

הגדרות התקן הבינלאומי

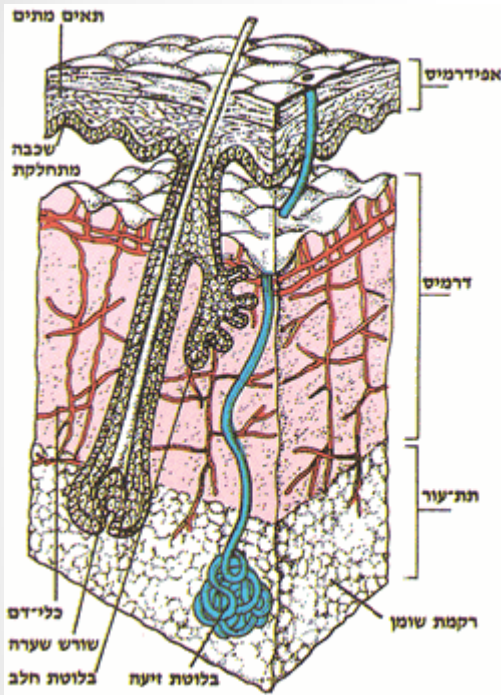
- ה TNO קובע כי שטף קרינת הספק של $1\text{KW}/\text{m}^2$ הנה כעוצמת שטף החום המקסימלי שעור האדם מסוגל לספוג למשך זמן רב ללא כאב
- תקן EN-1473 קובע שטף בעוצמה של $1.5\text{KW}/\text{m}^2$
- התקן האמריקאי של *US Department of Housing and Urban Development* קובע ששטף החום המקסימלי יהיה לא יותר מאשר $450\text{BTU}/\text{fr}^2/\text{Hr}$ או $1.4\text{KW}/\text{m}^2$
- תקן API-521 קובע צפיפות הספק (שטף) בעוצמה מקסימלית של $1.58\text{KW}/\text{m}^2$
- ארגון ההגנה בפני שרפות Society of fire protection מגדיר בספר שפורסם על ידו SFPE קובע $2.5\text{KW}/\text{m}^2$ כמקסימום נסבל ע"י בני אדם
- קיים וויכוח וטענות ששטף בעוצמה של $5\text{KW}/\text{m}^2$ הוא חסם מספק הגנה ואדם יוכל להימלט מסכנה בריצה תוך 20 שניות אבל טיעון זה לא ישם מן הסיבות הבאות:
 - בעייתי מאוד ואדם יחוש בכאב ולכן לא ישים לאוכלוסיות רגישות ואיזורים מאוכלסים
 - לא ניתן להימלט בתוך 20 שניות באיזורים צפופים ממקור החום
 - תקן NFPA-59 לא מציג את פרמטר משך החשיפה ולכן הגדרה זו בעייתית
- כאשר דנים במאגרי LNG גדולים באוניות, תרחיש דליפה, בקיעת מיכל הנוהרה אסון בשל גודל בריכת האש הפוטנציאלית שעלולה להיווצר.
 - טווחי הבטחון ומרחקי הפרדה הנם גדולים ונמדדים לפי הקריטריונים לשטף בין $1.5\text{KW}/\text{m}^2$ לבין $1.0\text{KW}/\text{m}^2$

הגדרות התקן הבינלאומי

- הגדרות קרינת החום כמופיע בתקן NFPA-59 אסורות כשיקול לסף הסכנה
- שטף בעוצמה של $5\text{KW}/\text{m}^2$ אינו מייצג נכונה את הסיכונים הפוטנציאליים שקיימים ממתקן LNG לאוכלוסייה רגישה חסרת מיגון ואו איזורם קריטיים ומבנים
- מודלים שפותחו ע"י ה-TNO וחישבו PROBIT מייצגים טוב יותר את סף הסיכון
- טווחי ביטחון הנם כ-3.7 ק"מ לכל הפחות

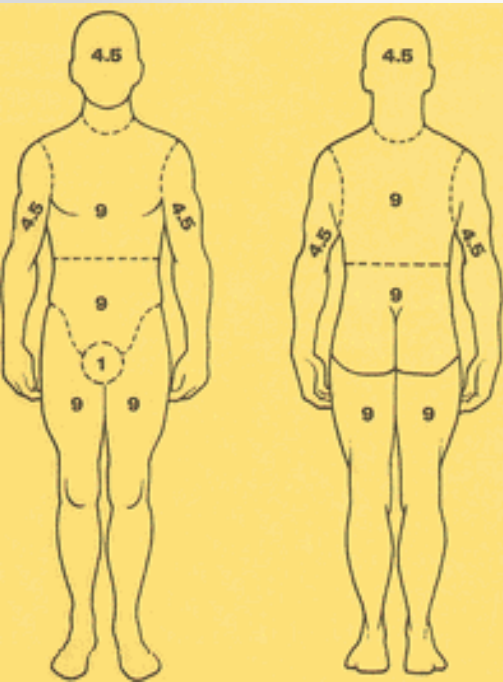
כוויות

• ברפואה מגדירים שלוש דרגות כוויה

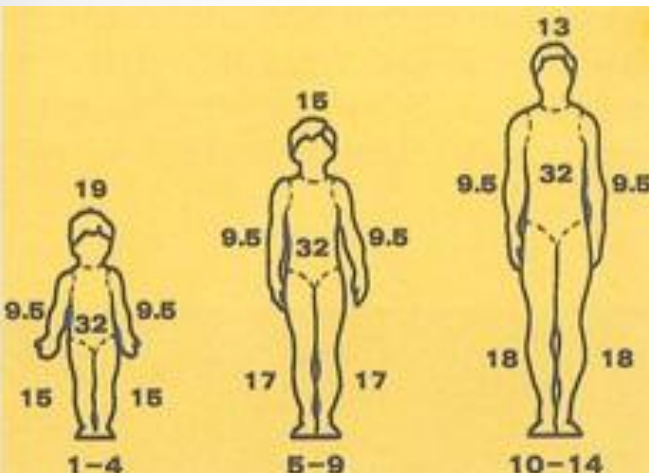


דרגת כוויה	סימפטומים ונזק
1	נוצרת כאשר שכבת העור החיצונה בלבד (האפידרמיס) נפגעת, למשל לאחר חשיפה של ממש לשמש.
2	נחלקות לכוויות שטחיות ולכוויות עמוקות. הכווייה השטחית היא פגיעה בשכבה החיצונית של העור ובשכבה הבאה מתחתיה, ואולם בשכבה השנייה עדיין נמצא מרכיבי עור תקינים העשויים להשתקם בתוך שבועיים-שלושה. בכווייה העמוקה שתי שכבות העור נהרסות, הריפוי נמשך זמן רב ובסופו תישאר צלקת
3	היא הכווייה החמורה ביותר: כל שכבות העור נשרפות פגיעה פנימית כולל עצמות

כוויות



חישוב שטח הכווייה בבוגר



חישוב שטח הכווייה בילדים עד גיל 14

- חישוב אחוזי הכווייה לפי שיטת התשעיות:
- שיטת התשעיות, המחלקת את גוף האדם לאזורים בני 9% או 18%, נוחה מאוד לחישוב מהיר של השטח הכווייה.

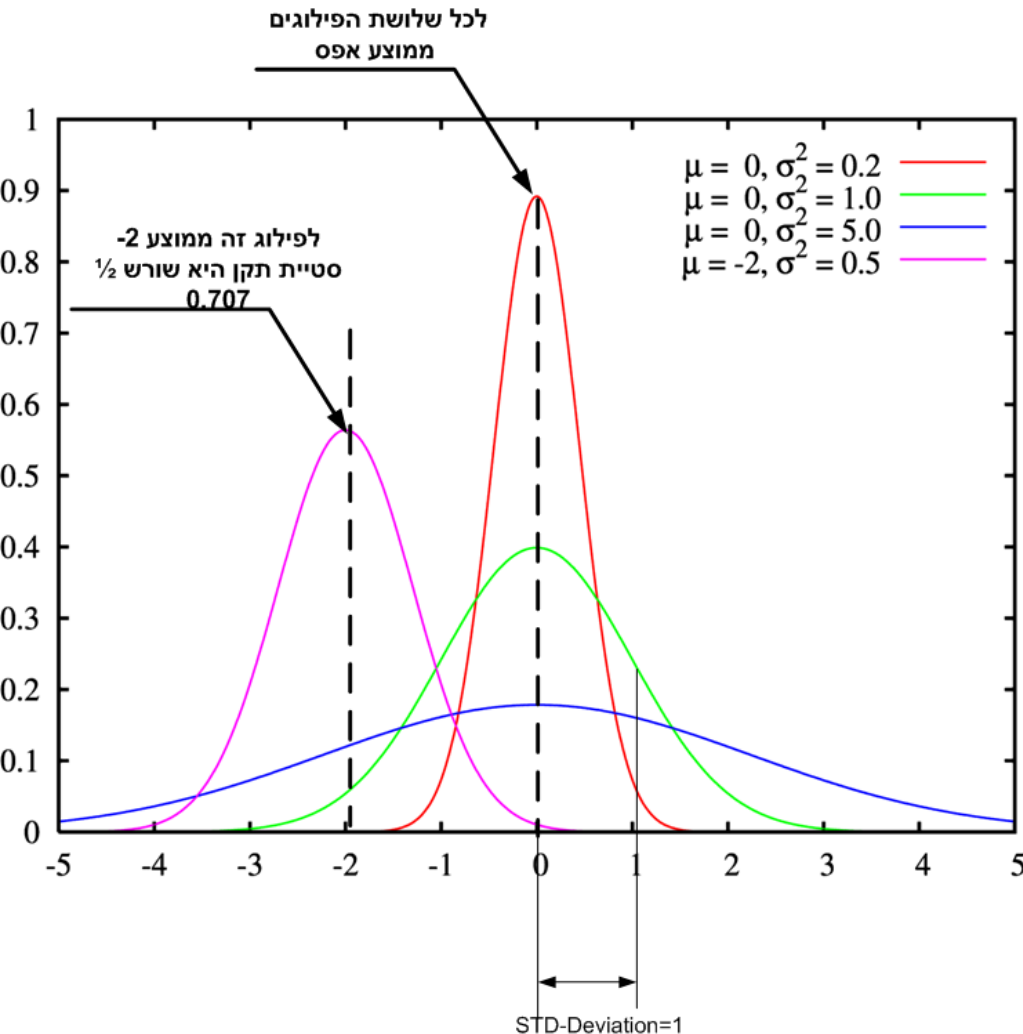
קביעת היקף הכווייה:

- ראש + צוואר 9%
- גפה עליונה 9%
- חזה + בטן 18%
- גב 18%
- גפה תחתונה 18%
- אזור אברי המין 1%

מודלים מתמטיים

- המאמרים השונים מציגים מודלים מתמטיים המבוססים על פונקציית Probit
- הפונקצייה משמשת לחיזוי רמת הפציעה וזמן חשיפה כתלות בארוע מסוכן בעוצמה מסויימת
 - Probit הנה פונקציית צפיפות הסתברות בפילוג נורמאלי (גאוסני)
 - לפונקצייה ממוצע 5
 - לפונקצייה סטיית תקן
- (שורש וואריאנס שמסומן באות היוונית סיגמא σ או שורש השונות נקרא גם STD DEVIATION $\sigma = \sqrt{Variance}$)

מודלים מתמטיים פילוג גאוס

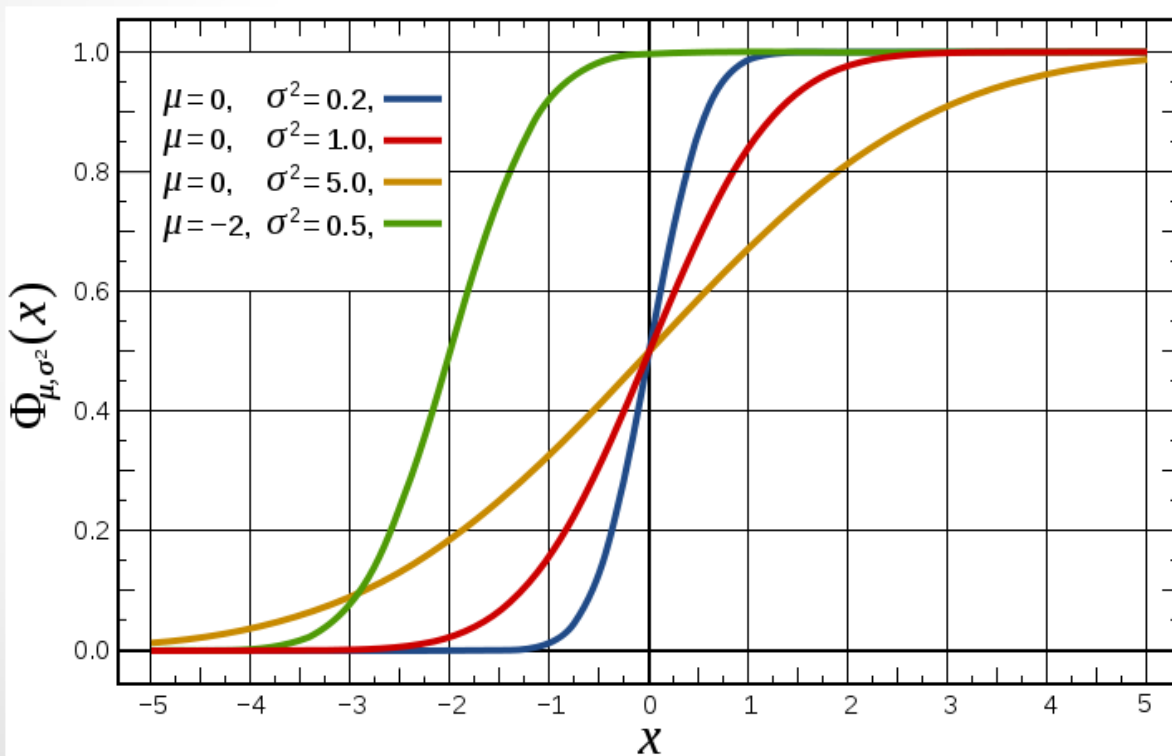


פונקציית הסתברות בפילוג נורמאלי

- הממוצע קובע את מיקום הפעמון של הגאוס (פונקציית צפיפות ההסתברות)
- סטיית התקן שהנה שורש הוואריאנס קובעת את אופי הפעמון כלומר מפתחו ואופי הפילוג

מודלים מתמטיים פילוג גאוס

- תוצאת האינטגרציה על פונקציית צפיפות ההסתברות מניבה את ההסתברות הכוללת כתלות בגודל המדגם



מודלים מתמטיים פילוג גאוס

- פונקציית צפיפות ההסתברות לפי פילוג גאוס נרשמת באופן הבא:

- $$f(x, \sigma, \mu) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

- כאשר

- x הוא משתנה סטטיסטי, x עצמו יכול להיות פונקצייה של גודל אקראי

- μ הוא הערך הממוצע של המדגם

- σ הוא סטיית התקן

- ההסתברות עצמה היא סכום כל המאוראות על כל מרחב המדגם ולכן בהצגה רציפה אינסופית ההסתברות היא אינטגרל על פונקציית הפילוג, שנקראת גם פונקציית צפיפות ההסתברות.

- לתוצאת האינטגרל קוראים Error-Function והסימן המתמטי הנו Erf

- לתוצאת האינטגרציה קוראים הסתברות אקומולטיבית Cum Sum

מודלים מתמטיים Probit

פונקציית צפיפות ההסתברות Probit לפי פילוג גאוס נרשמת באופן הבא:

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

כאשר

- x הוא משתנה סטטיסטי, x עצמו יכול להיות פונקציה של גודל אקראי שמיוצג על ידי Y כאשר Y הוא פונקציה
- μ הוא הערך הממוצע של המדגם והוא 5
- σ הוא סטיית התקן וזו שווה ל 1
- לביטוי $Y-5$ קוראים u

מתקבל

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(Y-5)^2}{2}}$$

מודלים מתמטיים Probit

חישוב ההסתברות לפגיעה בנפש לפי פונקציית Probit ייעשה ע"י אינטגרציה וחישוב פונקציית Erf שתתן את פונקציית ההסתברות האקומולטיבית וככל שהתופעה היא על כלל המדגם ההסתברות גדלה

$$\begin{aligned} \bullet \text{ Probit}(x \leq Y - 5) &= \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(u)^2}{2}} du \\ &= \int_{-\infty}^{Y-5} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(Y-5)^2}{2}} dY = \frac{1}{2} + \text{Erf} \left(\frac{Y-5}{\sqrt{2}} \right) \end{aligned}$$

• Y הוא פונקצייה זמנית המייצגת חשיפה לחומר רעיל בריכוז C ומשך זמני t רשומה באופן הבא כאשר C קבוע בזמן

$$\bullet Y = A + \ln[C^N t]$$

○ כאשר A | B קבועים

○ אם C משתנה במשך זמן החשיפה יש לבצע אינטגרציה על C לפי t

$$\bullet Y = A + \ln\left[\int C^N dt\right]$$

מודלים מתמטיים Probit

פונקציית צפיפות ההסתברות Probit ישימה גם לקרינת חום ולכן המשתנה Y יוחלף בפונקצייה הבאה

$$Y = A + \ln\left[I^{\frac{3}{4}}t\right]$$

כאשר

I מייצג את עוצמת צפיפות הספק קרינת החום ביחידות W/m^2

t מייצג את משך החשיפה בשניות

A ו B הנם קבועים פרמטרים שהופקו ממדידות או שוערכו באופן מדעי

Heat Radiation Probit Parameters (taken from the TNO Green Book)⁸

כבטבלא

Thermal Radiation Flux. kW/m ²	Observed Effect
37.5	Sufficient to cause damage to process equipment
25.0	The minimum energy required to ignite wood at indefinitely long exposure (nonpiloted)
12.5	The minimum energy required for piloted ignition of wood, and melting of plastic tubing. This value is typically used as a fatality number
9.5	Sufficient to cause pain in 8 seconds and 2nd degree burns in 20 seconds.
4.0	Sufficient to cause pain to personnel if unable to reach cover within 20 seconds. However, blistering of skin (second degree burns) is likely; 0% lethality
1.6	Will cause no discomfort for long exposure

⁸ CPR-16E, "Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials", First Edition, 1992, published by TNO.

מודלים מתמטיים Probit

- זמן החשיפה לקרינת החום הנו קריטי
- מהירות ההימלטות מן המקום לאיזור בטוח משפיעה על סטטיסטיקת המוות והפגיעה
- זמן המילוט הסטטיסטי משפיע על משך החשיפה ומובא במודל הבא
- $$t_e = t_r + 0.6 \frac{x}{V} \left[1 - \left(1 + \frac{V}{x} t_V \right)^{-\frac{5}{3}} \right]$$
- כאשר
 - t_e זמן חשיפה אפקטיבי לאירוע
 - t_r זמן תגובה בשניות בדרך כלל 5 שניות כבטבלא
 - x הוא המרחק במטרים בכדי להגיע לאיזור בטוח של $1\text{KW}/\text{m}^2$
 - t_V הוא הזמן בשניות הנדרש בכדי להגיע לאיזור בטוח של $1\text{KW}/\text{m}^2$
 - V מהירות ההימלטות ביחידות m/sec בכדי להגיע לאיזור בטוח של $1\text{KW}/\text{m}^2$

מודלים מתמטיים Probit

- זמני תגובה אופייניים t_r להימלטות מחשיפה לקרינת חום
 - ככל שזמן התגובה מתארך ניתן להימלט רחוק יותר ממקור החום ולהוריד את הסכנה שבחשיפה
 - המילוט תלוי באפשרות הפיזית והפיזיולוגית להימלט בהנחה שלא נגרם לגוף נזק

Intensity (kW/m ²)	Time to react (s)
22	0.2
18	1.5
11	3.5
8	5.5
5	9.0
2.5	25.0

¹⁰ K. Cassidy and M. F. Pantony, "Major industrial risks - a technical and predictive basis for on and off site emergency planning in the context of UK legislation," Symposium Series No. 110, 1988, pages 75-95, Institute of Chemical Engineers, Hemisphere Publishing Corporation.

מודלים מתמטיים Probit

- פרמטר Y המשמש לשיערוך הפגיעה בפונקציית PROBIT נתון בטבלא הבאה כתלות בנזק הרפואי שהנו רמת הכוויה

יש להציב $t = t_r$ ○

Heat Radiation Probit Parameters

Damage	Probit
First degree burns	$Y = -39.83 + 3.02 \ln tI^{4/3}$
Second degree burns	$Y = -43.14 + 3.02 \ln tI^{4/3}$
Fatality (Unprotected)	$Y = -36.38 + 2.56 \ln tI^{4/3}$
Fatality (Protected)	$Y = -37.23 + 2.56 \ln tI^{4/3}$

נלקח מתוך ○

: TNO Green Book

⁸ CPR-16E, "Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials", First Edition, 1992, published by TNO.

מודלים מתמטיים Probit

• הסתברות פגיעת כוויה כתלות במשך החשיפה לקרינת חום

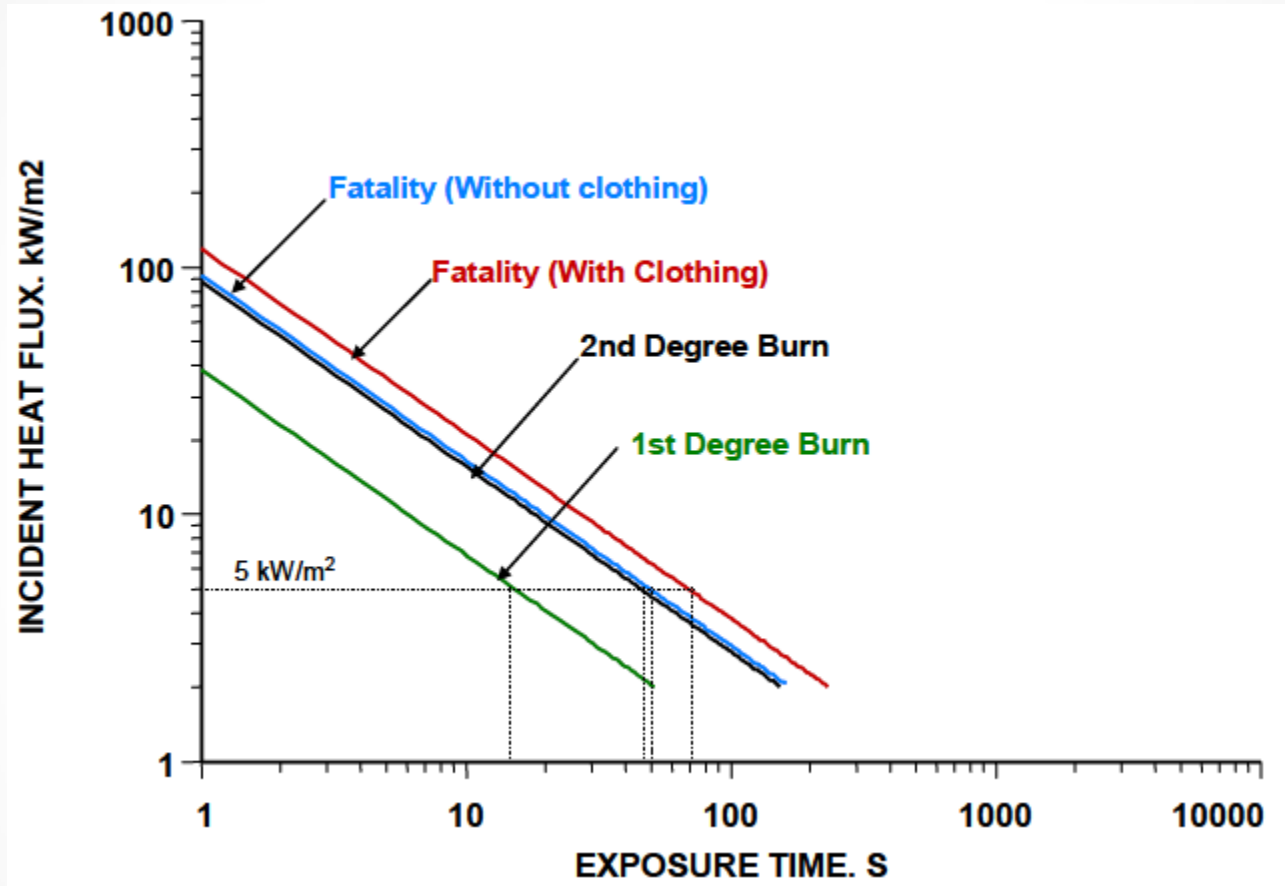
Report on Comments — Copyright, NFPA

NFPA 59A

Burn Injury vs. Modified Heat Dose

Effect	Modified dosage $10^{-4} \times [(W/m^2)^{(4/3)} s]$	Time for injury at Intensity of $5 kW/m^2$
Threshold of blistering ⁽¹⁾	210 - 700	25 - 82
Second degree burn ⁽²⁾	1,200	140
Third degree burn Threshold	1,060	124
Third degree burn, 50% mortality ⁽³⁾	2,300	269
a There is evidence for a region of constant injury between these limits. b Second degree burns with a burn depth of 0.1 mm. This value is approximately the same as that for 1% mortality. Burn depth increases linearly up to a thermal load value of 2600. c Third degree burns with a burn depth of 2 mm. This value is approximately the same as that for 50% mortality. Source: Part of information in the table from Lees (1996)		

מודלים מתמטיים Probit

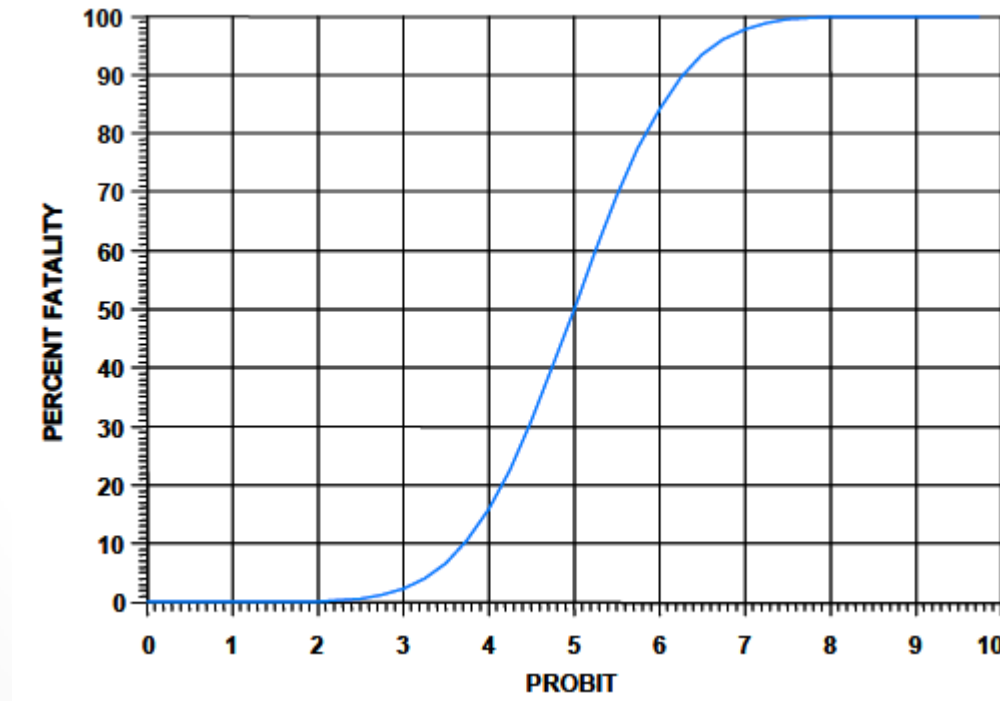


- תוצאות חישוב פרמטריות (כשהפרמטר רמת הכויה ומוות) של
- הסתברות פציעה ומוות כתלות במשך זמן החשיפה כנגד עוצמת שטף החום

מודלים מתמטיים Probit

- תוצאת חישוב ההסתברות המצטברת של פונקציית Probit הנה Cum-Sum

- ציר אנכי תוצאת האינטגרציה על פונקציית צפיפות ההסתברות ציר אופקי ערך Y עד אליו בוצעה האינטגרציה



רמות קרינת חום

- רמות שטף קרינת החום לפגיעות כוויה הן נושא שנוי במחלוקת
- הגרף מציג תוצאות ניסוי למדידת סף הזמן לפציעות כתלות במשך זמן החשיפה כאשר הסף המדובר 5KW/m^2

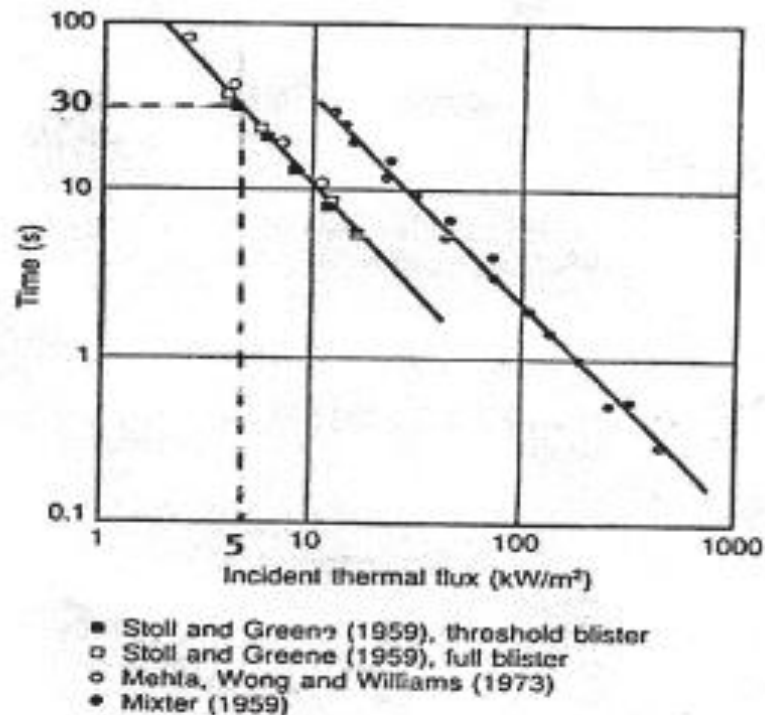
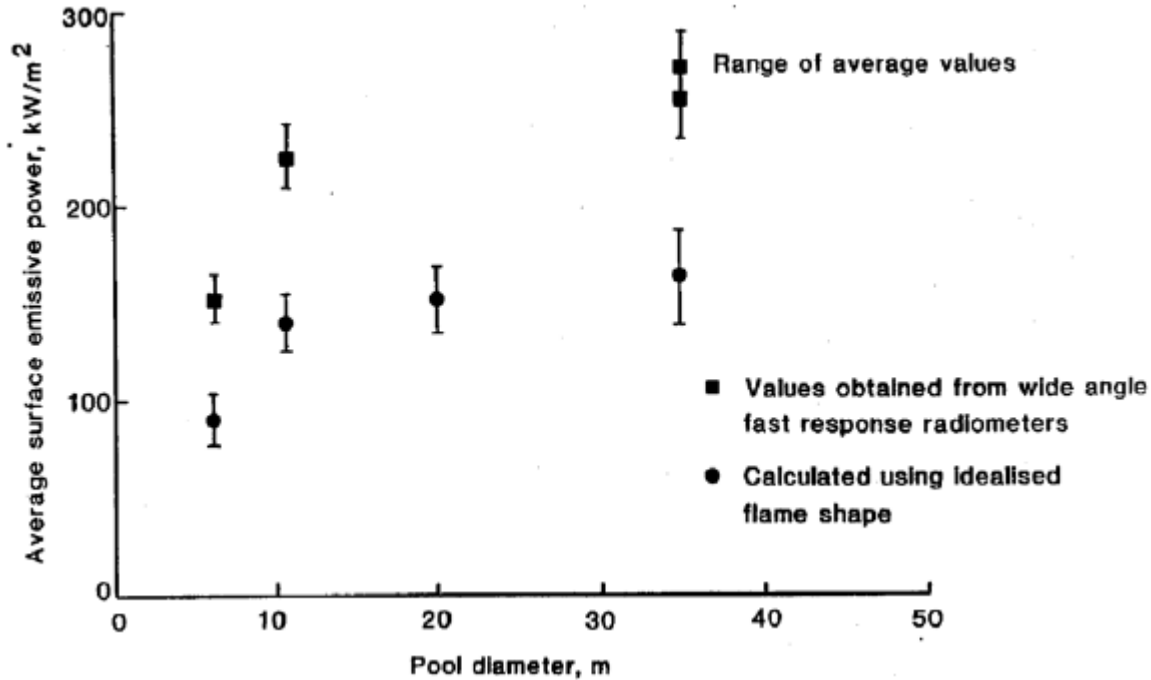


Figure 1B: Threshold for Blister

רמות קרינת חום

- קיים קשר ישיר בין קוטר בריכת האש הפוטנציאלית מ LNG לבין עוצמת החום מאותה בריכה כמובא בגרף מטה

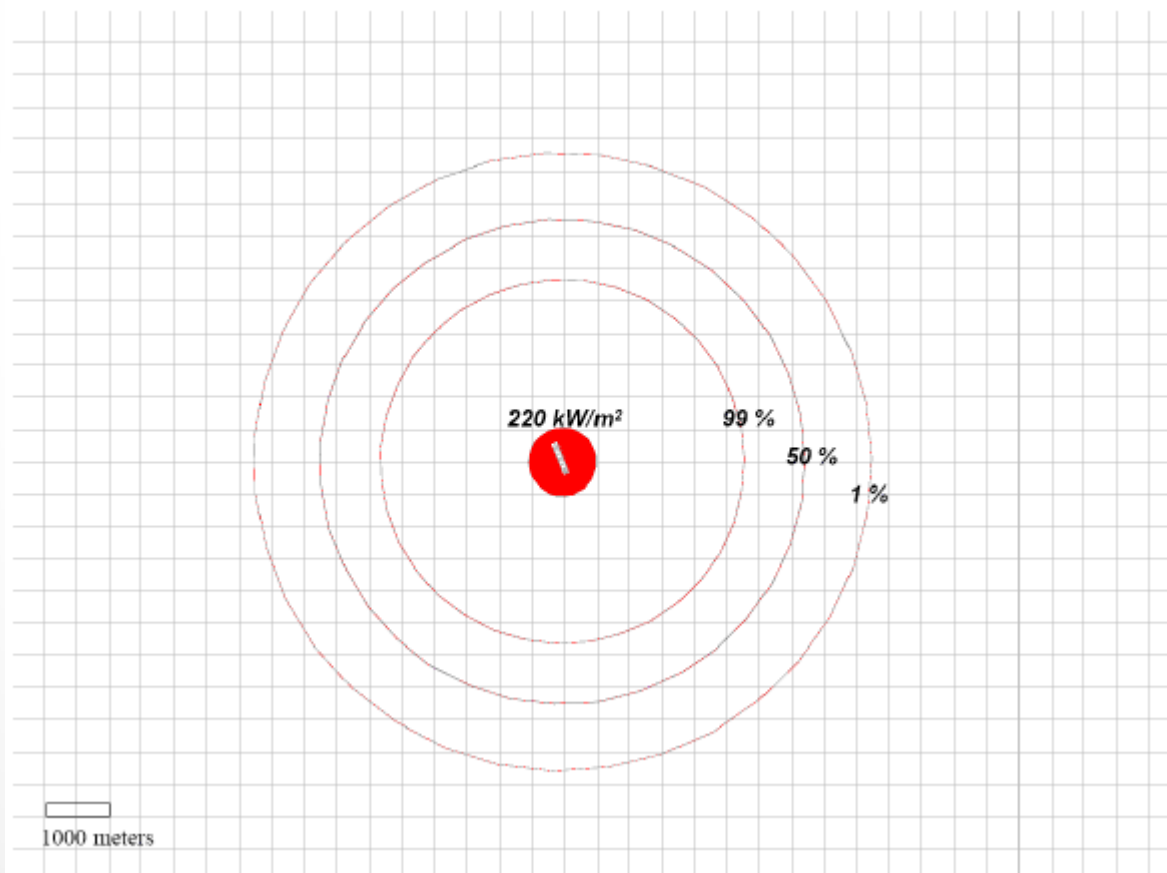


⁵ Nedelka, D., Moorhouse, J., and Tucker, R., "The Montoir 35-m Diameter LNG Pool Fire Experiments", Paper 3 Session III of International Conference on Liquefied Natural Gas: LNG 9 Proceedings, Nice, France, 1989.

תוצאות מחקרים לסיכונים

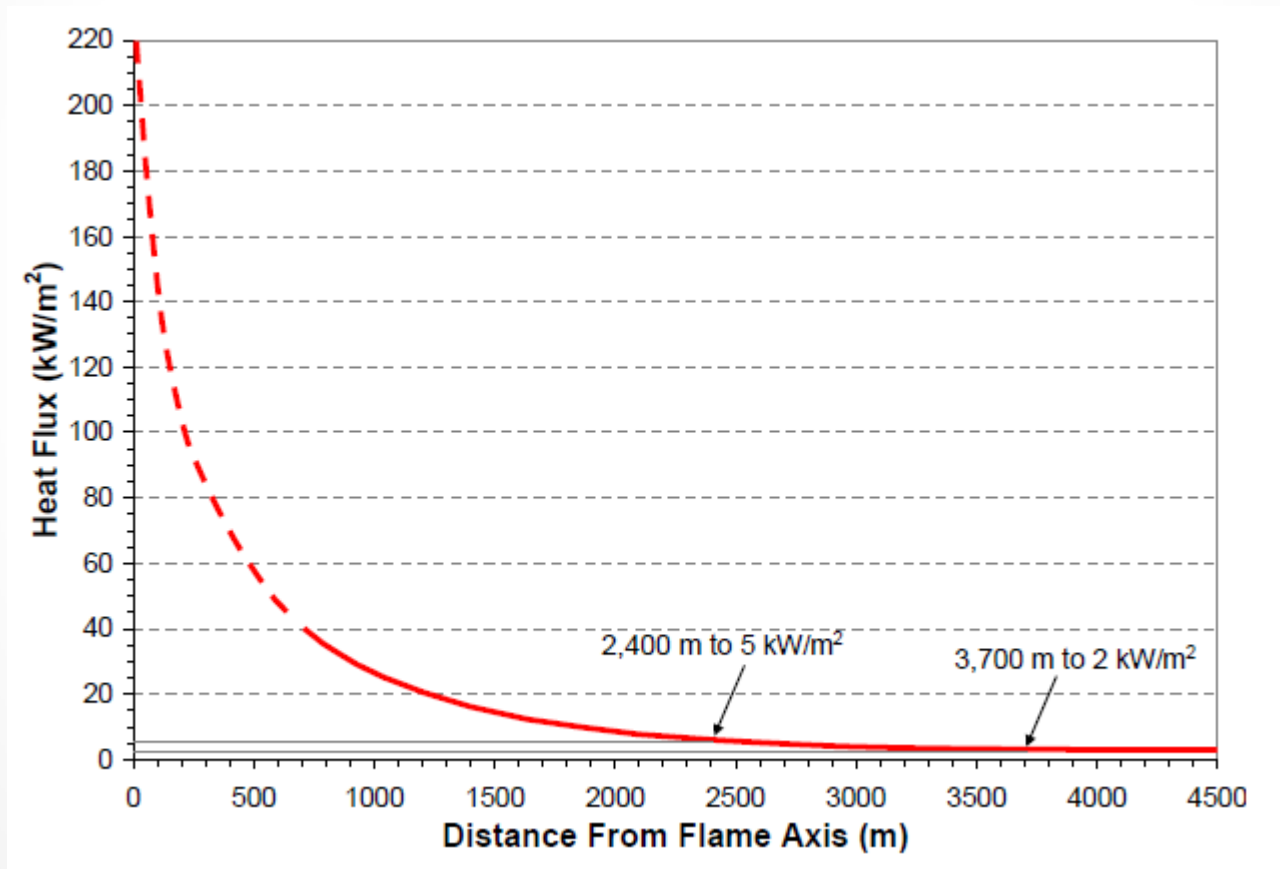
- טווחי הביטחון לאוניית LNG הנושאת נפח גז מונזל של $200,000\text{m}^3$ ל 50% פגיעות פאטאליות 3.7 ק"מ לא כולל תוספת קרינת חום מן השמש

• הנחת החישוב שיחרור משך 5 דקות של $150,000\text{m}^3$



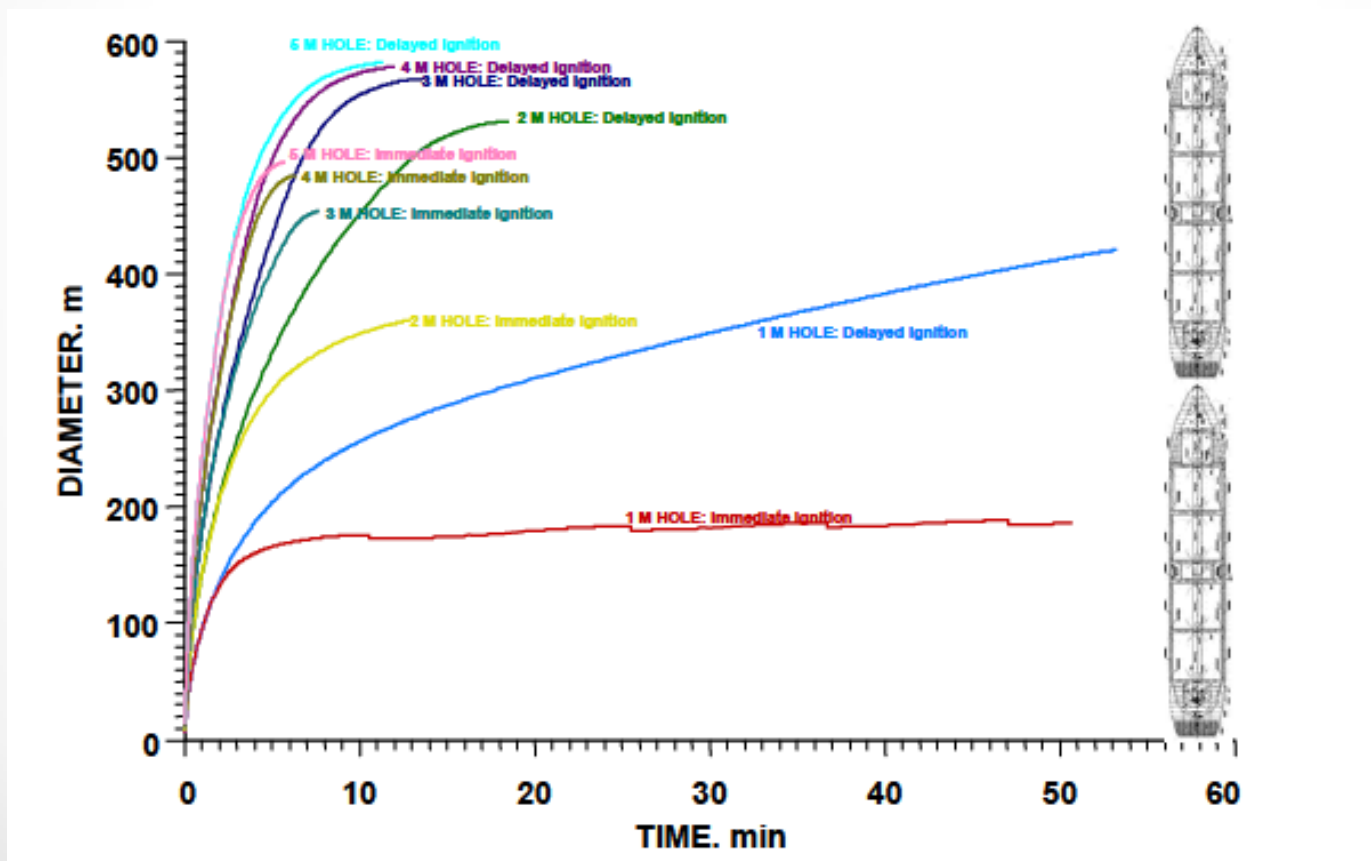
תוצאות מחקרים לסיכונים

- טווחי בטחון לשטף הספק על פי חישובי מעבדות Sandia
 - נדרש טווח של 3.7 ק"מ לפחות בכדי לעמוד בשטף קטן מ $2\text{KW}/\text{m}^2$

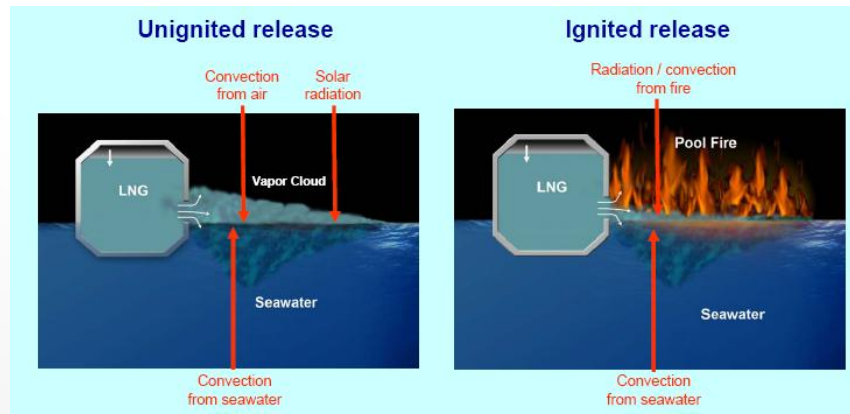
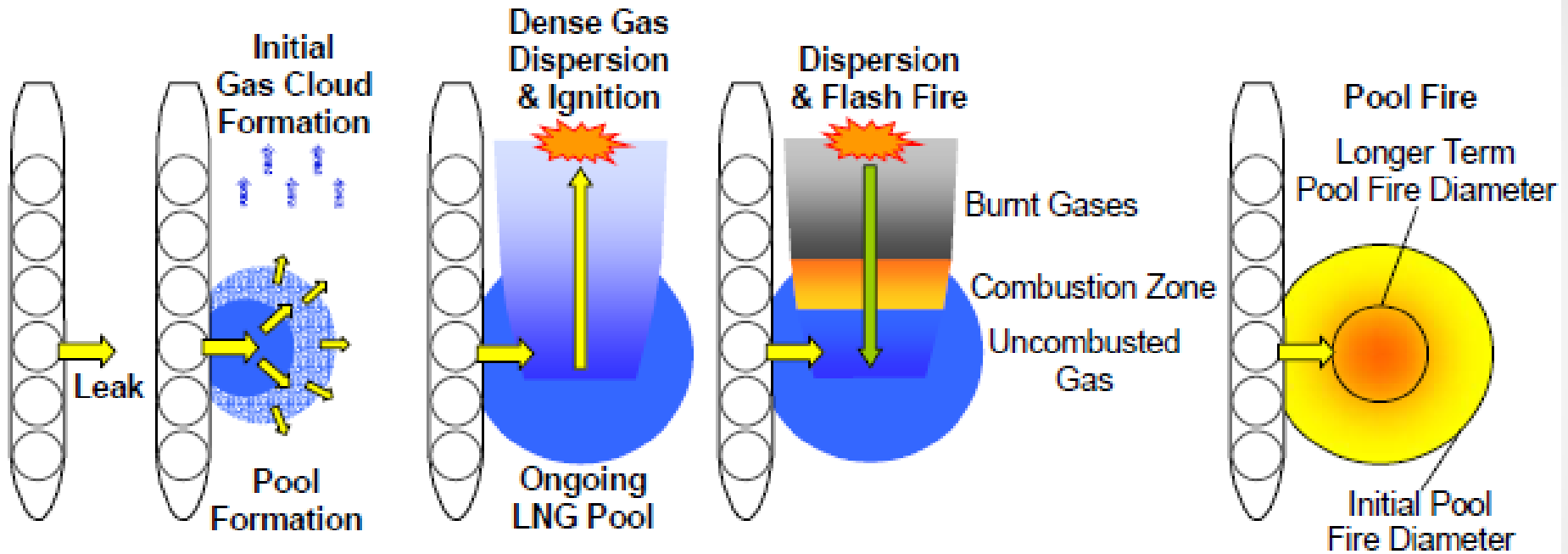


תוצאות מחקרים לסיכונים

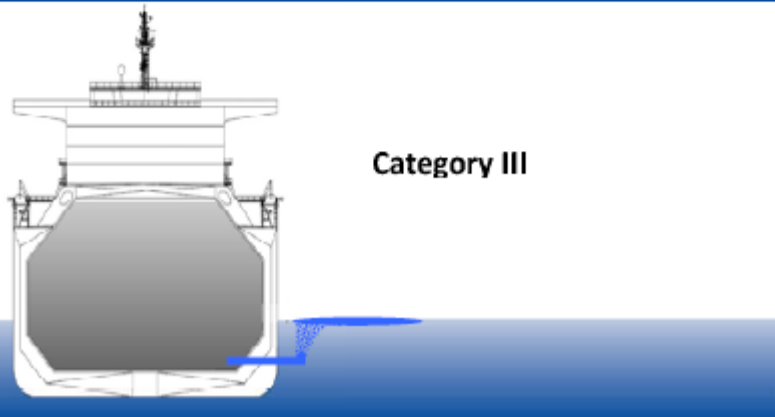
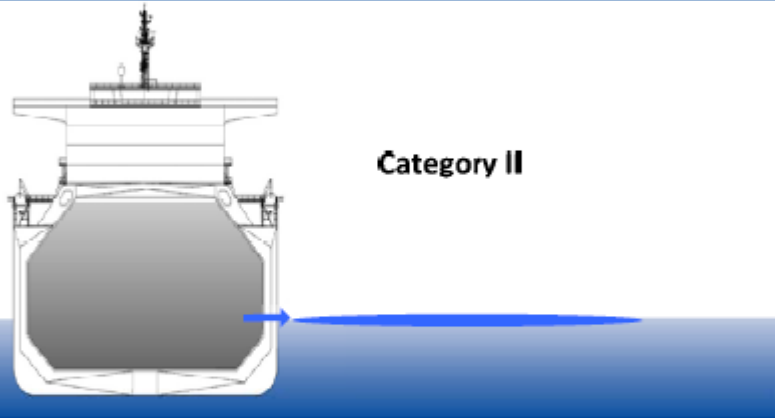
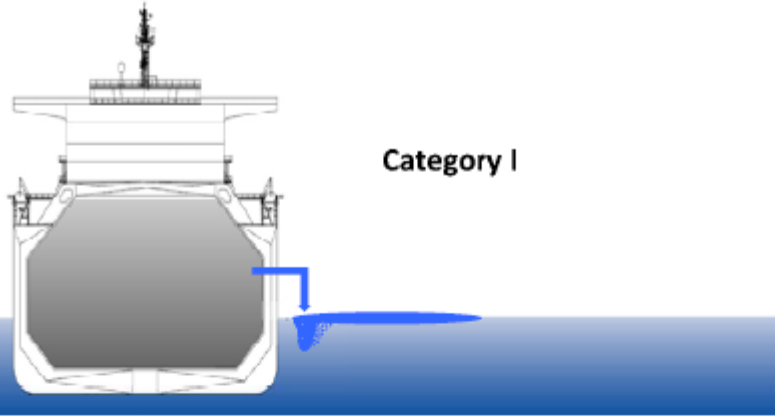
- קצב בניית בריכת אש כתלות בזמן כאשר קוטר החור באונייה הוא פרמטר כאשר גודל המיכל הנו $25,000\text{m}^3$



תהליך ייצירת בריכת אש מאוניית LNG



דליפה מאונייה



- קיימים שלושה תסריטים של דליפה מאוניית LNG
 - חור מעל פני המים
 - חור בפני המים
 - חור מתחת לפני המים
- לאוניות LNG קיר כפול
 - קיר דופן
 - קיר מיכל
 - המרווח בין לבין מרווח של חלל BALAST נטל.

דיון

- האם יש בארץ תקן בנושא
 - לפי מה נערך החישוב לאתר חדרה