

## שדרוג סיסמי למתקני חומרים מסוכנים

מהנדס (M.Sc) ירון אופיר\*, מהנדס (B.Sc) אלכס שוחט\*,  
ד"ר (PhD) אלכס כהן\*\*, מהנדסת (M.Sc) ענת צור\*\*  
*\*ירון אופיר מהנדסים בע"מ, \*\*הז-מט בע"מ*

### תקציר:

בשנת 2005 דרש המשרד להגנת הסביבה מ-20 המפעלים אשר מכילים את החומרים המסוכנים ביותר לסביבה, לבצע פיילוט שיבדוק את עמידות המתקנים שמכילים את התהליך המסוכן ביותר של כל אחד מהם לסביבה במקרה שתתרחש רעידת אדמה חזקה, ולשדרגם סיסמית במידה שלא נמצאו עמידים. לצורך טיפול בבעיה זו חברה קבוצה רב-תחומית הכוללת אנשי מקצוע מתחום ניהול הסיכונים, התהליך הכימי, מכונות, מבנים, קרקע וסיסמולוגיה. מכיוון שהמתקנים התקפים כיום אינם מטפלים עדיין בסוגיות הקשורות בשדרוג כזה כמכלול, פותחה מתודולוגיה לטיפול הכולל. הטיפול הרב-תחומי והשימוש בגישת התכן התפקודי תוך חקירה אנליטית ריאליסטית הכוללת התחשבות בהתנהגות לא ליניארית ודינאמית של תרחישי הכשל, הובילו לעיתים ליישום פתרונות שדרוג יוצאי דופן. במסגרת זו יוצגו ויודגמו מספר סוגיות ופתרונן לחלק הטיפול ההנדסי-מבני, כמו חיזוק מיכלים על התקני שקילה, שדרוג צנרת, שדרוג מגדלי פלדה נושאי חומ"ס תחת אילוצי ביצוע קשים וכד'.

### 1. התמודדות עם הדילמה שבין הצורך בהגנה על חיי האדם ובין עלויות החיזוקים הגדולות לטיפול במפעלים ישנים:

נזק משמעותי למתקן המכיל חומ"ס (חומרים מסוכנים) עלול להוביל לדליפת חומ"ס הרת אסון שעלולה לגבות חיי אדם רבים, אם מהתפשטות החומר עצמו, או מפיצוץ ושריפה שתתהווה בעקבות הדליפה ויש למנוע את התרחשותה, ללא קשר לסיבה שהביאה להתרחשות הדליפה. השילוב של: א) תופעה סיסמית אקראית, ב) הסכנה בתהליך יצור שמעורב בו חומ"ס ו-ג) מבני תעשייה ומתקנים קיימים וישנים שלא תוכננו בד"כ לעמוד בהטרחות סיסמיות, יוצר סיכון גבוה מאוד להיווצרות דליפה ואירוע כימי קשה במקרה שתתרחש רעידת אדמה בינונית או חזקה בישראל. כדי להתמודד עם שילוב מורכב ומסוכן כזה, יש צורך בבנייתם של הליכים הנדסיים בהירים, מעודכנים טכנולוגית וסדורים אשר יאפשרו ביצוע פתרונות (תהליכיים או מבניים) ברי-ביצוע בתוך מפעל קיים, תוך כדי המשך תפקודו, במינימום הפרעה ובעלות כספית סבירה. לשדרוג מתקני חומ"ס דרוש שילוב בין מספר תחומי התמחויות. מהנדס מבנים שיתכנן חיזוק ומומחה גיאופיסי שיגדיר סיכון סיסמי לא יספיקו לבדם במקרה זה, ויש צורך במעורבות פעילה של אנשי

מקצוע נוספים כמו: מהנדס כימי שיכיר את התהליכים הכימיים הנדונים וידע לאפיין את אפשרויות המניעה התהליכיות, מומחה סיכונים כימי להערכת השפעת הסיכונים לסביבה ולחיי אדם ומשמעותם, ואנשי התפעול והאחזקה במפעל שיגדירו צרכים ומגבלות של המפעל בזמן ביצוע השדרוג ולאחריו ועוד.

הגישה הישירה ביותר לפתרון הבעיה יכלה להיות שדרוג מבני כולל או בנייה מחדש לכל הרכיבים המבנים הציוד והמתקנים שאובחנו כפגיעים, אך מימוש 100% מניעה באזורים בעלי סיכון סימני עלול להיות יקר מאוד, במיוחד כאשר מדובר במתקנים ישנים. הקונפליקט בין הגנה על חיי אדם והסביבה מצד אחד והעלויות השדרוג הגדולות מצד שני, אמור להיות מוכרע ע"י קובעי המדיניות, תוך קביעת גבול רציונאלי לרמת השדרוג שנדרשת מהמפעלים ע"י השלטונות. היטיבו לתאר זאת Porush and Bachman (2003) בהתייחס לתעשייה בקליפורניה, באמירה הרלוונטית גם לישראל:

*"It is not politically feasible (nor is it desirable) to replace the industrial infrastructure of coastal California. Any attempt to suggest that because such facilities do not meet the latest codes that they all must be strengthened, or worse, torn down, would result in essentially nothing being done, and nothing being accomplished in reducing current seismic risk".*

המשרד להגנת הסביבה פרסם מדריך מדיניות (Warszawski, A. and Yankelevsky, D. (2005) שמנסה להגדיר כמותית פרופורציות בין רמת הנזק הצפוי ברעידת אדמה ומידת השדרוג שצריך להיות מושקע במניעתו. על בסיס מדריך זה פותחה מתודולוגיה לטיפול הכולל ורב דסיפלינארי. הקורא מופנה למאמר שהוצג בכנס רעידות האדמה העולמי ה-4 שנתי שהתקיים בסין באוקטובר האחרון לתיאור מפורט והדגמה שלה: (A.A COHEN, Y. OFFIR, A. TZUR & al (2008) במסגרת זו יוצגו ויודגמו מתוך המתודולוגיה שפותחה רק סוגיות בעלות עניין לחלק הטיפול ההנדסי-מבני.

## **2. קריטריוני תכן למניעת דליפה במתקני חומ"ס:**

מכיוון שהתקינה הישראלית הרלוונטית בנושא עמידות מבנים לרעידות אדמה אינה חלה על מתקנים הנדונים (החרגה למבנים שהתקן אינו חל אליהם - ראה/י בתי 413, סעיף 105.2.3: מפעלי תעשייה כימיים או מבנים שהריסתם יכולה לסכן אוכלוסייה רחבה), העבודה מתבצעת לפי הנחיות ותקנים (חמורים) מתקדמים יותר ומקובלים בעולם המערבי אשר מתייחסים באופן מיוחד לטיפול במבנים ומתקנים קיימים הנושאים חומ"ס (לדוגמא ראה/י מראי מקום 2-5), בין היתר באמצעות חקירה מעמיקה וריאליסטית יותר של אופן התפתחות הכשלים במבנים ובמתקנים תוך הדמיית ההתנהגות הדינאמית והלא ליניארית שלהם.

התכן התפקודי (performance base design) היא גישה שהתפתחה ב-10 השנים האחרונות בעולם כגישה תכן מובילה לצורך שיפור ההתמודדות ההנדסית עם רעידות האדמה ומפורטת בתקנים המתקדמים הנ"ל. בטבלה 1 מתוארות ארבע רמות תפקוד לרכיבים לא מבניים (N-A:-D), שמוגדרות בתקנים המתקדמים באופן כזה שניתן לקשור ביניהן ובין פרמטרי תכן הנדסיים כמותיים אשר ניתנים להגדרה ברורה (כמו רמת סבוב פלסטי בפרק של רכיב מבני עליו נשען הרכיב הלא מבני או רמת ההסטה בקומה בה הוא נמצא וכד').

**Table C1-7 Nonstructural Performance Levels and Damage<sup>1</sup>—Contents**

Contents	Nonstructural Performance Levels			
	Hazards Reduced <sup>2</sup> N-D	Life Safety N-C	Immediate Occupancy N-B	Operational N-A
Computer Systems	Units roll and overturn, disconnect cables. Raised access floors collapse. Power not available.	Units shift and may disconnect cables, but do not overturn. Power not available.	Units secure and remain connected. Power may not be available to operate, and minor internal damage may occur.	Units undamaged and operable; power available.
Desktop Equipment	Some equipment slides off desks.	Some equipment slides off desks.	Some equipment slides off desks.	Equipment secured to desks and operable.
File Cabinets	Cabinets overturn and spill contents.	Cabinets overturn and spill contents.	Drawers slide open, but cabinets do not tip.	Drawers slide open, but cabinets do not tip.
Book Shelves	Shelves overturn and spill contents.	Books slide off shelves.	Books slide on shelves.	Books remain on shelves.
<b>Hazardous Materials</b>	Minor damage; occasional materials spilled; gaseous materials contained.	Minor damage; occasional materials spilled; gaseous materials contained.	<b>Negligible damage; materials contained</b>	Negligible damage; materials contained.
Art Objects	Objects damaged by falling, water, dust.	Objects damaged by falling, water, dust.	Some objects may be damaged by falling.	Objects undamaged.

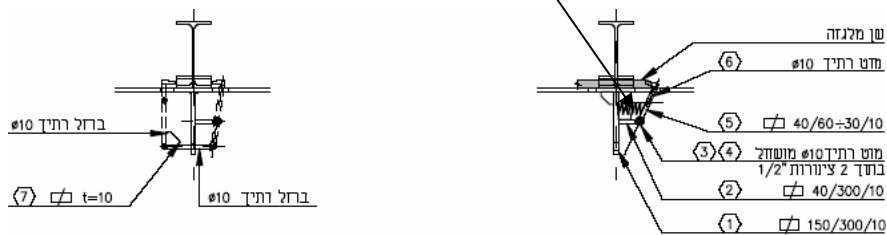
**טבלה 1 :** רמות נזק לקריטריוני תכן שונים לחומרים מסוכנים (ASCE 46-06 (2007).

באליפסה מסומנת רמת נזק מקסימאלית מותרת למתקן המכיל חומ"ס. השגת רמה כזו מאפשרת קבלת נזק זניח בלבד שלא מסכן חיי אדם או את הסביבה. יודגש עם זאת כי אין כל מניעה לאפשר נזקים מוגבלים למבנים ההנדסיים המכילים או נושאים את החומרים המסוכנים, ובלבד שנזקים אלה יהיו ברמה כזו שלא תסכן את המתקן והצנרת הנדונים.

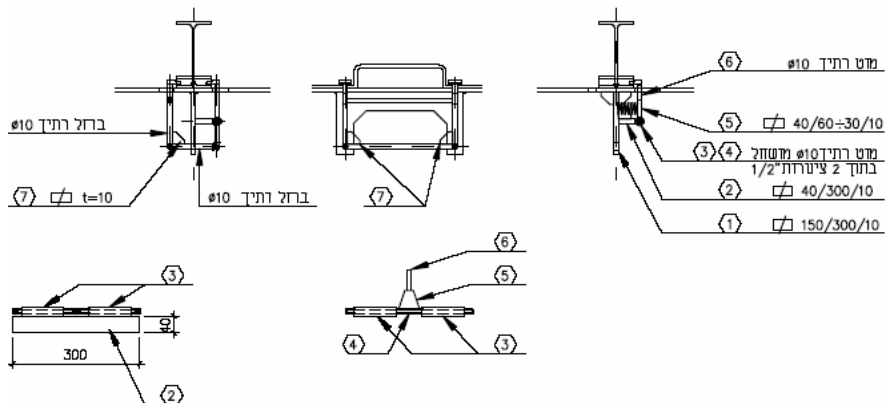
**3. מספר דוגמאות לפתרון סוגיות הקשורות בטיפול הנדסי-מבני במתקני חומ"ס:**

a. שדרוג בסיס למיכל אמוניה נייד המחייב מתן אפשרות להחלפה תכופה. מיכל אמוניה המשמש כחלק מתהליך ייצור בתעשייה הכימית מונח על אדני שקילה ואינו מחובר אליהן. החישוב מראה כי הוא חשוף להיפוך ולכן עלול לקרוע צנרת המחוברת אליו ומתחייב מיגון מפני עומסי רעידות אדמה. מכיוון שהמיכל מוחלף אחת ל-30 שעות השדרוג חייב לאפשר נידוד בתדירות גבוהה, ולהתאים להחלפה שמתבצעת ע"י מלגזה וכן אסור לו להפריע למנגנון השקילה החיוני לתפעול המערכת. לפיכך הפתרון שנבחר הוא ביצוע פרט עיגון הנעול במצב שרות ומשורר באופן מכאני ע"י שיני המלגזה אוטומאטית בעת הרמת המיכל בעת ההחלפה (איור 1). הפתרון הנ"ל

עונה לאילוצים הקיימים ובנוסף מונע גם את הצורך בהסתמכות המיגון על שיקול הדעת של מלגזן או איש תפעול בנוגע לנעילה ידנית של המיכל.



**מתקן נעילה פתוח (בעת החלפת המיכל ע"י המלגזה)**  
1:10

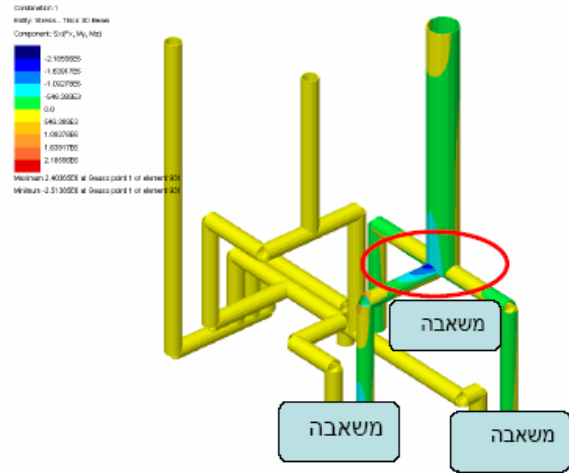
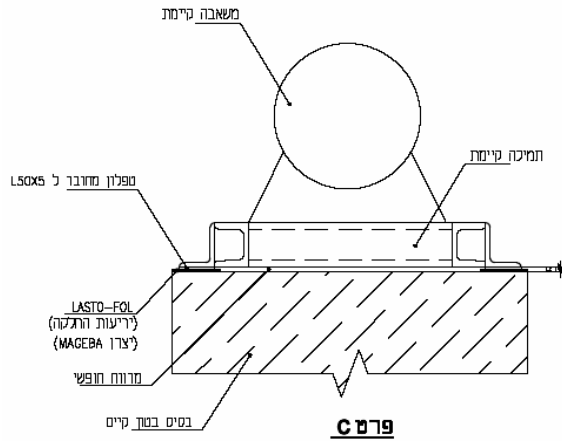


**מתקן נעילה סגור במצב שרות (אמוניה זורמת)**

**איור 1:** פרט לעיגון מיכל אמוניה נייד כולל מנגנון לשחרור מכאני ע"י מלגזה בעת החלפת מיכלים.

**b.** צנרת מקובעת באופן קשיח בין מיכל למשאבה:

מיכל קירור באמוניה במפעל מזון מונח על מסגרת מוגבהת וגמישה אשר תתנווד בעת רעידת אדמה. משאבת אמוניה מקובעת לרצפת בטון ומחוברת דרך צנרת קשיחה וקצרה למיכל האמוניה. התזוזה של המיכל יחסית לרצפה ברעידת אדמה תגרום לכשל בצינור לדליפת אמוניה (אליפסה באיור 2). פרט השדרוג מנתק את המשאבה מהרצפה ומאפשר תזוזה שלה יחד עם המיכל ובכך נמנע הכשל.



איור 2: פרט לעיגון מיכל אמוניה נייד כולל מנגנון לשחרור מכאני ע"י מלגזה בעת החלפת מיכלים

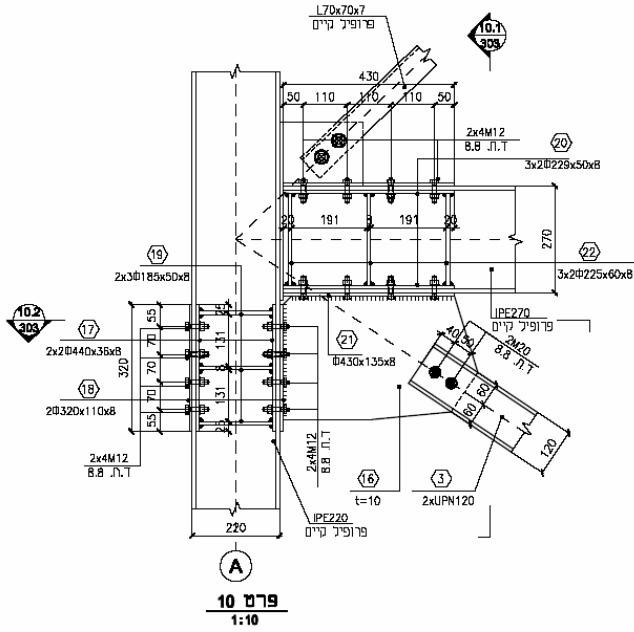
c. טבעת חביקה חיצונית למניעת התרוממות וכשל של מיכלי חומ"ס גדולים ברעידת אדמה.



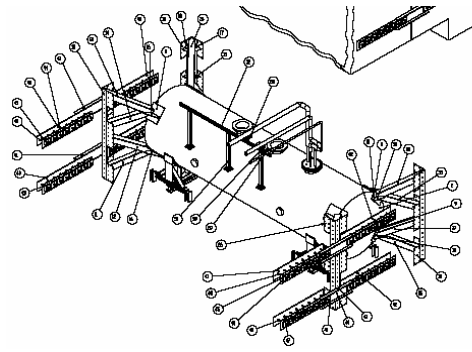
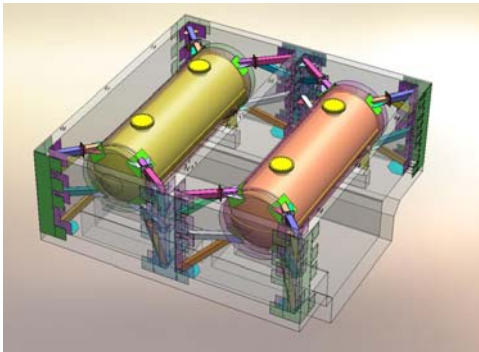
איור 3: חבק פלדה דרוך ומעוגן לבסיס בטון שיושם באזור בו לא ניתן לטפל במיכל החומ"ס עצמו.

d. חיזוק עמודת פלדה התומכת סקרבר במתקן כימי.

אנליזה דינאמית בזמן ולא ליניארית (time history – non linear) שנערכה למגדל פלדה שנושא מערכת גיבוי להגנה על חומ"ס בגובה של מעל 20 מטר, אפשרה חיזוקים מינוריים בלבד לרעידת אדמה. החיזוקים התבצעו בד"כ עזרת חבקים בגלל אווירה מימנית מתלקחת השוררת באזור המגדל.



איור 4: חיזוקים בעזרת חבקים למגדל פלדה נושא חומ"ס שנמצא באזור רווי מימן בסכנת התלקחות.



איור 5: חיזוקים למיכלי חומ"ס באזור בעל סיסמיות חזקה.

e. מיגון מיכלי חומ"ס הממוקמים בבונקר באזור בעל סיסמיות גבוהה.

מיכלי חומ"ס גדולים מונחים על התקני שקילה ללא תסבולת אופקית ואנכית מספיקה לרעידות אדמה. רמות התאוצות הגבוהות הצפויות לרעידה בת.חזרה של 2500 שנה (מעל תאוצת הכובד אופקי ואנכי) חייבו שדרוג משמעותי שבוצע בעזרת זרועות לבונקר הבטון שימנעו שמיטת המיכל (איור 5).

פרטי החיבור בין כלונסאות הביסוס לרצפת הבונקר לא עמדו ברמת ההטרחות הגבוהה וכדי שלא תיגרם תזוזה יחסית שתקרע צנרת החומ"ס שעוברת בינו ובין בונקר שכן, בוצע חיבור בניהם ע"י פרופילים חיצוניים וברגים דרוכים.

#### **4. מסקנות:**

- a. פותחה מתודולוגיה שמאפשרת טיפול כללי ורציונאלי בחומ"ס לרעידת אדמה. המתודולוגיה ניתנת לכוונון ע"י קובעי המדיניות בנוגע ליחס שבין מידת ההשקעה בשדרוג מול עלות הנזק.
- b. שיתוף פעולה הדוק בין אנשי מקצוע במכלול התחומים הרלוונטיים למתקני חומ"ס יוצר תנאים ליצירת מיגון בר ביצוע ויעיל.
- c. שימוש בכלי התכן-התפקודי מאפשר הבנת תרחישי הכשל הצפויים ואיתור פתרונות מבניים פשוטים ופרקטים בד"כ.

#### **5. מראי מקום (חלקיים):**

1. A. A COHEN, Y. OFFIR, A. TZUR & al (2008), *Multidisciplinary Efforts in Seismic Risk Assessment and Retrofitting of Existing Facilities Containing Hazardous Materials*, procedures of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008, Beijing, China
2. California Accidental Release Prevention Program (2004), Guidance for CalARP Seismic Assessments, *Region 1 Local Emergency Planning committee (LEPC)*, California.
3. ASCE-SEI 41-06 (2007), Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, *American Society of Civil Engineers- ASCE Standard USA*. Follow to FEMA 356 (2000), FEMA 440 (2005).
4. ASCE 7-05 (2005) Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, *ASCE Standard USA*.
5. ALA , American Lifelines Alliance (2002), Seismic Design and Retrofit of Piping Systems, Written under contract to the ALA, a public-private partnership between the Federal Emergency Management Agency (FEMA) and the American Society of Civil Engineers (ASCE).
6. Porush, A.R and Bachman, R.E. (2003) CalARP seismic evaluation guidelines for existing facilities containing hazardous materials; Proceedings of seminar on seismic design performance and retrofit of non-structural components in critical facilities.
7. Warszawski, A. and Yankelevsky, D. (2005). A method for determining the level of risk for Earthquake retrofitting of existing industrial facilities containing hazardous materials (in Hebrew).