

מעבר לתקן: מדוע תוכנות התכנון הסטנדרטיות

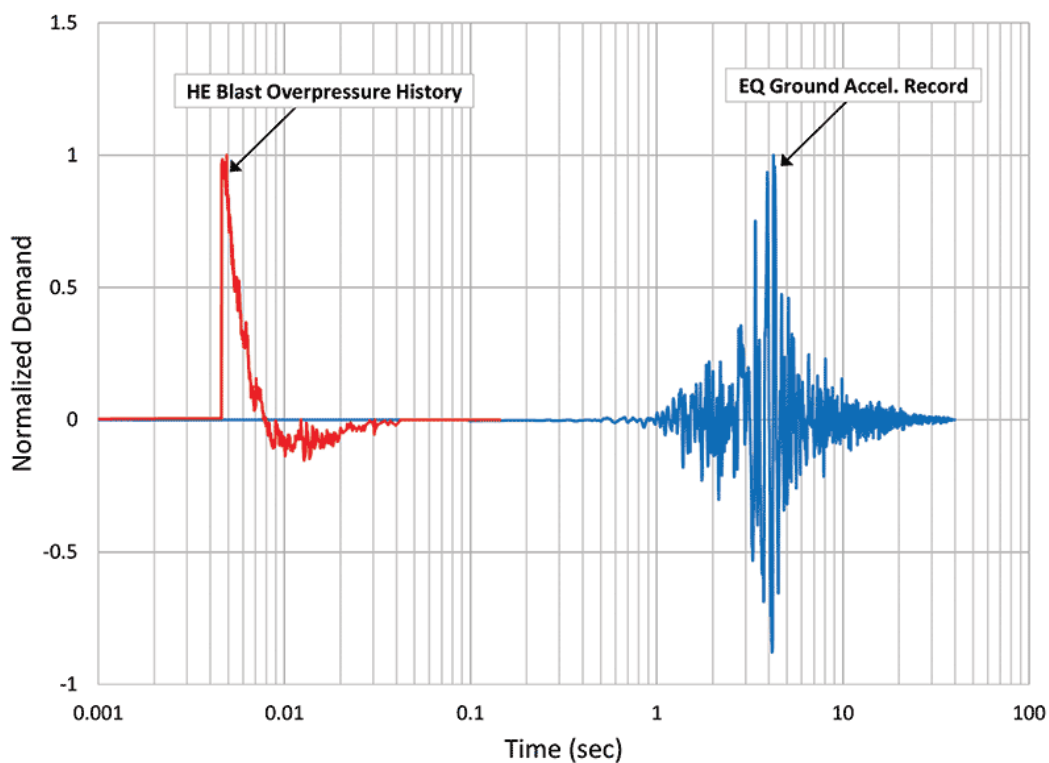
נכשלות בחישובי פיצוץ ?

והמעבר ל - Explicit Dynamics

מאת: תומי בורנשטיין

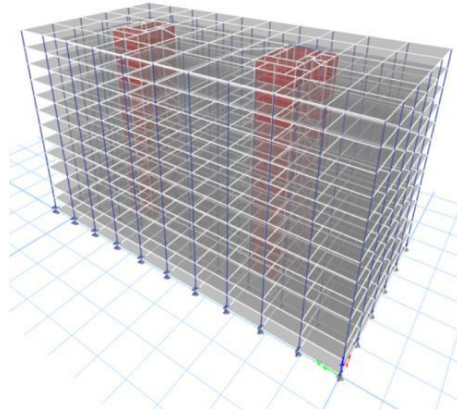
1. תקציר

הנדסת הבניין הקלאסית מסתמכת על כלי תכנון המבוססים על גישת ה Implicit לפתרון בעיות סטטיות ודינמיות. בעוד כלים אלו מצטיינים בתכנון לרעידות אדמה וכבידה, הם נתקלים במחסום פיזיקלי ומתמטי כאשר נדרש תכנון כנגד איומי קיצון בקצביים גבוהים (כגון High Strain Rates) פיצוץ והלם. מאמר זה סוקר את ההבדלים המהותיים בין הגישות, את חוקי השימור המכתיבים את הפתרון ומדוע אימוץ כלי Explicit מתקדם הוא צעד הכרחי לקידום ההנדסה האזרחית בישראל.



2. מבוא: אזור הנוחות של המהנדס

כמהנדסי קונסטרוקציה, ארגז הכלים היומיומי שלנו מורכב לרוב מתוכנות מבוססות Implicit Solvers (כדוגמת SAP2000, ETABS, STRAP, Midas Gen ועוד). תוכנות אלו הן "סוסי עבודה" אמינים, הן מבוססות על הנחת יסוד של שיווי משקל (Global Equilibrium), הפיכת מטריצות קשיחות $[K^{-1}]$ ומספקות פתרונות מעולים לעומסי כבידה, רוח, ואפילו לרעידות אדמה.



מבנה ב ETABS

המשוואה השולטת: (Implicit)

המערכת פותרת את משוואת שיווי המשקל הדינמית עבור צעד הזמן הבא $t + \Delta t$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F^{ext}(t)\}$$

כדי למצוא את ההזזות $\{u\}$, התוכנה חייבת לבצע אינוורסיה (היפוך) למטריצת הקשיחות:

$$\{u\} = [K]^{-1} \cdot \{F_{eff}\}$$

הצוואר בקבוק: פעולת ההיפוך $[K]^{-1}$ היא כבדה מאוד חישובית, ודורשת שהמערכת תתכנס לשיווי משקל בכל צעד. בפיצוץ, כשהבטון נסדק והמטריצה משתנה בשבריר שנייה, התהליך הזה נכשל ("אי-התכנסות").

אולם, המציאות הביטחונית והדרישות ההנדסיות המודרניות מפגישות אותנו יותר ויותר עם תרחישי קיצון: עומסי הדף (Blas-load) פגיעה בליסטית, או קריסה בשרשרת (progressive collapse) (המבנה בבת-ים). במקרים אלו הניסיון "לא לצ" את התוכנות הסטנדרטיות לספק פתרון עלול להוביל לתוצאות שגויות, לא שמרניות ואף מסוכנות.

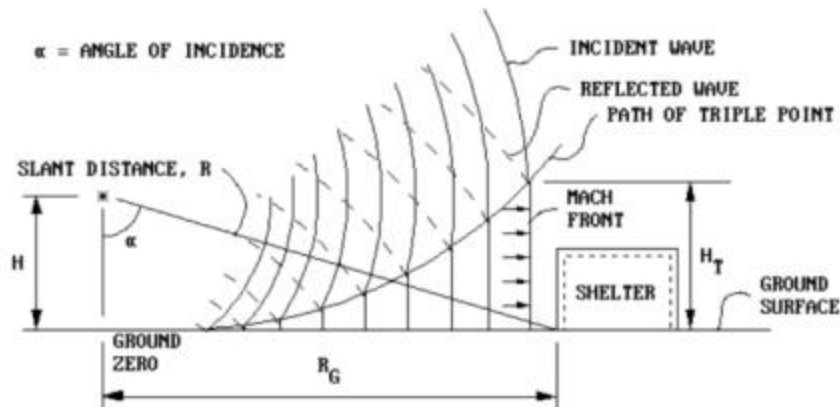


צילום: מוטי מילרוד

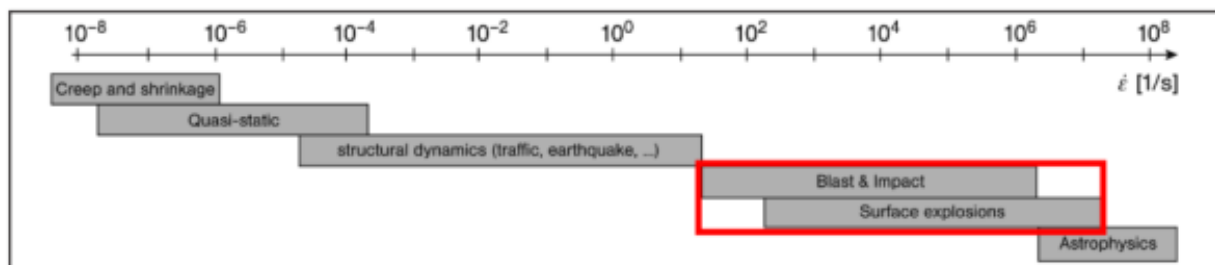
3. הפיזיקה של תגובת המבנה

ההבדל המרכזי בין עומס סטטי או דינמי-סיסמי לעומס פיצוץ הוא **משך זמן האירוע ביחס לזמן התגובה של המבנה**. ההבדל המרכזי בין עומס סטטי או דינמי-סיסמי לעומס פיצוץ הוא משך זמן האירוע ביחס לזמן התגובה (זמן המחזור הטבעי - T_n) של המבנה. בעוד שברעידת אדמה משך העומס נמדד בשניות והוא ארוך משמעותית מזמן המחזור של המבנה, בפיצוץ אנו עוסקים בעומס הלם (Impulsive Loading) הנמשך מספר מילישניות. במצב זה, העומס מסתיים עוד לפני שהאלמנט הספיק לפתח תזוזה משמעותית או להעביר את הכוחות לסמכים. כתוצאה מכך, האינרציה (ההתמד) של החומר והמסה המקומית הופכים לגורמים הדומיננטיים ביותר בהתנגדות, בניגוד לקשיחות הגלובלית שקובעת את הטון באנליזות סטנדרטיות בגישת ה- Implicit הסטנדרטית, ההנחה היא שהכוח "מורגש" בכל המבנה בו זמנית, והמערכת שואפת למצוא איזון כוחות $[\sum F = 0]$ בכל צעד זמן של חישוב. שיטה זו מאפשרת צעדי זמן גדולים, אך היא "ממצעת" את התופעות המהירות. באירוע פיצוץ, הפיזיקה משתנה לחלוטין:

גלי הלם (Shock Waves): העומס לא עובר דרך "קשיחות המבנה", אלא דרך גלי לחץ שנעים בתוך החומר במהירות הקול (או מהר יותר). האירוע המקומי מסתיים לעיתים עוד לפני שהמבנה הכללי "הבין" שמשוהו קרה.



שינוי תכונות החומר: בטון ופלדה תחת קצב מעוות גבוה (High Strain Rate) מתנהגים אחרת לגמרי מאשר בלחיצה במכשש מעבדה סטטי.



תוכנות ה- Implicit פשוט מדלגות על הפיזיקה הזו, הן אינן בנויות לפתור אי-רציפות כמו מחיקת-אלמנטים (Erosion), סדיקה מסיבית או מעבר פאזה של החומר.

4. הפתרון: Explicit Dynamics וחוקי שימור (מסה תנע ואנרגיה)

כדי להתמודד עם אתגרים אלו, אנו עוברים לשימוש בתוכנות Explicit Dynamics (כגון LS-DYNA, Abaqus Explicit). בניגוד לגישה הקודמת, Explicit solver, אינו מחפש שיווי משקל ואינו הופך מטריצות, הוא פותר את הבעיה בצעדי זמן (לרוב בקצבי זמן של מילישנייה או מיקרו שנייה תלוי תופעה)

שלושת חוקי ומבוסס על פתרון מלא ומצומד-מטריצות השימור בכל צעד זמן:

- **שימור המסה (Conservation of Mass):** קריטי בעומסים בעלי קצבים גבוהים כמו: הדף, נגיפה, חדירה והלמים למיניהם בהם יש דחיסות גבוהה וקצבי עיבור מהירים.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho v}{\partial y} = 0$$

- **שימור התנע (Conservation of Momentum):** פתרון ישיר של החוק השני של ניוטון

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u^2}{\partial x} + \frac{\partial \rho u v}{\partial y} = -\frac{\partial (p + q)}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \Pi_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \Pi_{xy}}{\partial y} - \frac{\Pi_{\theta}}{r} + \rho g_x$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho u v}{\partial x} + \frac{\partial \rho v^2}{\partial y} = -\frac{\partial (p + q)}{\partial y} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \Pi_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \Pi_{yy}}{\partial y} + \rho g_x$$

- **שימור האנרגיה (Conservation of Energy):** חישוב האנרגיה הפנימית והקינטית באמצעות.

$$\frac{\partial \rho I}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \rho I u}{\partial x} + \frac{\partial \rho I v}{\partial y} = -(p + q) D + \Pi_{xx} \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial x} + \Pi_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{u \Pi_{\theta}}{r} + \Pi_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} + \Pi_{yy} \frac{\partial v}{\partial y}$$

בניגוד לסטטיקה שם מחפשים שיווי משקל (כוח=0), כאן אנחנו פותרים את החוק השני של ניוטון בכל צעד זמן קטן.

המשוואה המפורשת: (The Explicit Solver) במקום לחפש שיווי משקל גלובלי, אנו פותרים את החוק השני של ניוטון ישירות עבור התאוצה

$$\{a\}t = [M]^{-1} (\{F_{ext}\}t - \{F_{int}\}t)$$

היתרון הקריטי:

1. מטריצת המסה $[M]$ היא אלכסונית (Lumped Mass), ולכן ההיפוך $[M]^{-1}$ שלה היא מידי ופשוט חישובית

2. הכוחות הפנימיים מחושבים ברמת האלמנט הבודד $\{F^{int}\}$.

3. אין איטרציות: התאוצה מחושבת << ממנה המהירות << וממנה המיקום החדש לצעד הבא. המחשב לא "נתקע" בניסיון לאזן כוחות, מה שמאפשר סימולציה של שבר מלא, רסס וניתוק חומר.

5. המלכודת GIGO (garbage-in garbage-out)

המעבר לתוכנות Explicit- טומן בחובו סכנה מקצועית והנדסית. בעוד שתוכנת Implicit תתריע על מודל לא יציב. תוכנת Explicit כמעט תמיד תספק תוצאה ויזואלית. השאלה הקריטית היא: האם זה נכון פיזיקלית? בסימולציות אלו, אין "ברירת מחדל". ללא תהליך מסודר של כיול מודל החומר (Calibration) מול ניסויים – הסימולציה חסרת ערך הנדסי (Validation).

6. מקרי בוחן מהשטח (Case Studies)

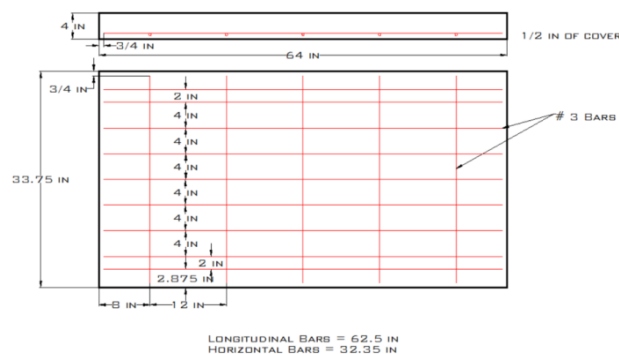
כדי להמחיש את המשמעות של, להלן דוגמאות מחישובים שביצעת

6.1 מקרה 1: פיצוץ על קיר בטון (Blast-Load)

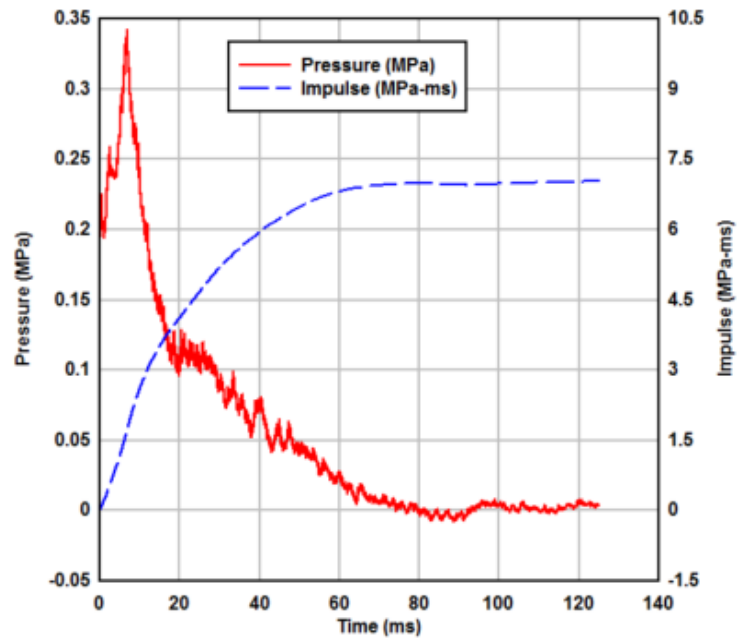
בסימולציה זו נבחן עמידות קיר בטון מזוין על בסיס ניסוי סימולאטור לעומס פיצוץ (BLS- blast load simulator) אשר מדמה פיצוץ בלחץ גבוה. ניסוי, שבוצע ע"י מרכז המחקר הנדסי של הצבא האמריקני (ERDC-The U.S. Army Engineer Research and Development Center), על פלטות בטון בעובי של כ- 10 ס"מ על מנת להעריך את תגובת הבטון לעומס דינאמי ועל מנת לכייל חישובים דינאמיים וסימולציות על מנת לתכנן נכון ובצורה כלכלית. שחזור הניסוי התבצע על סמך המאמר של Thiagarajan and Johnson (2014) ושימוש במודלי חומר המצוינים בטבלה. סימולציית הכיול בוצעה בתוכנה הידרו-דינאמית LS-DYNA.



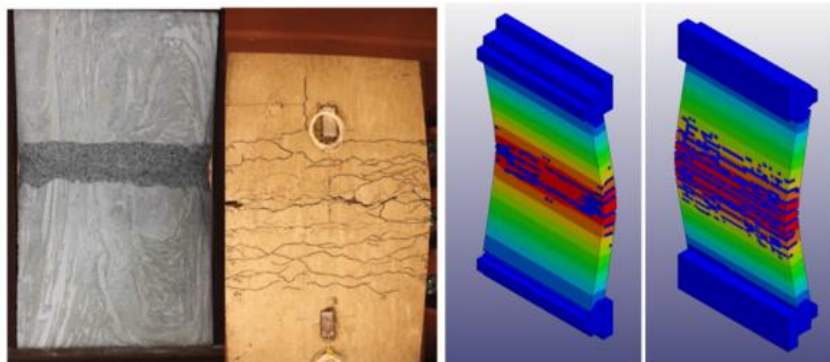
סימולאטור מדמה עומס פיצוץ של מכון המחקר הנדסי של הצבא האמריקאי (ERDC)



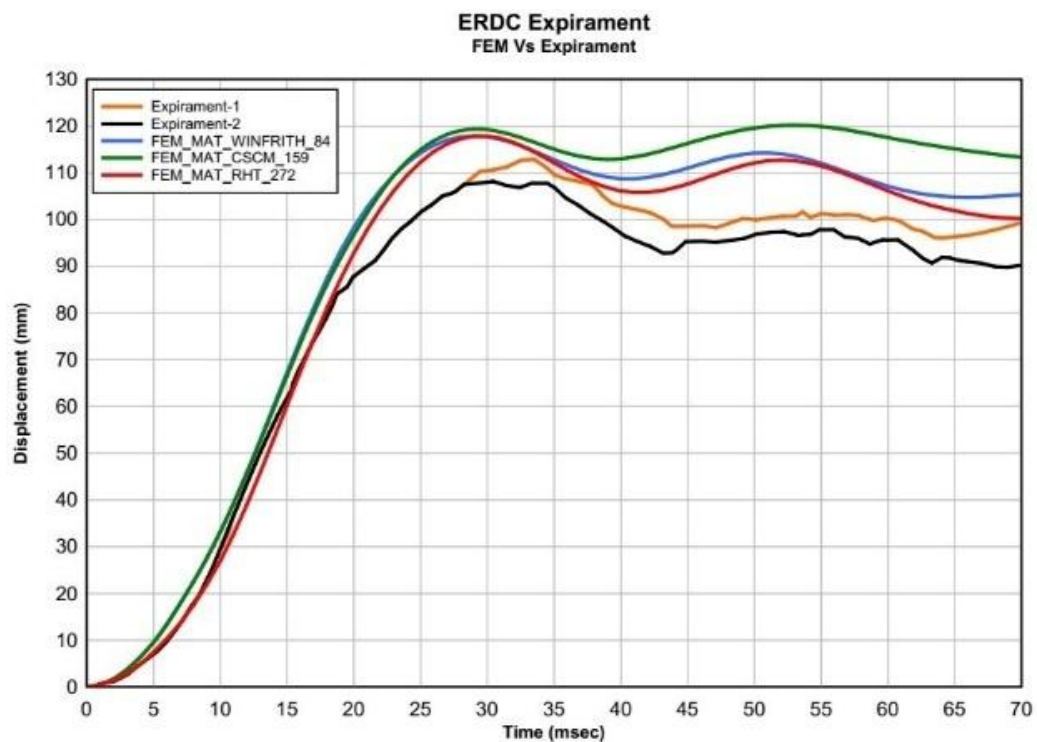
שרטוט של פלטת בטון כולל פלדת זיון Thiagarajan and Johnson (2014)



היסטורית עומס כנגד זמן הפועל על מרכז הפלטה (Thiagarajan and Johnson (2014)



תוצאות כפיפה של ניסוי של ERDC מול סימולציה (FEM) בתוכנת LS-DYNA (Thiagarajan and Johnson (2014)



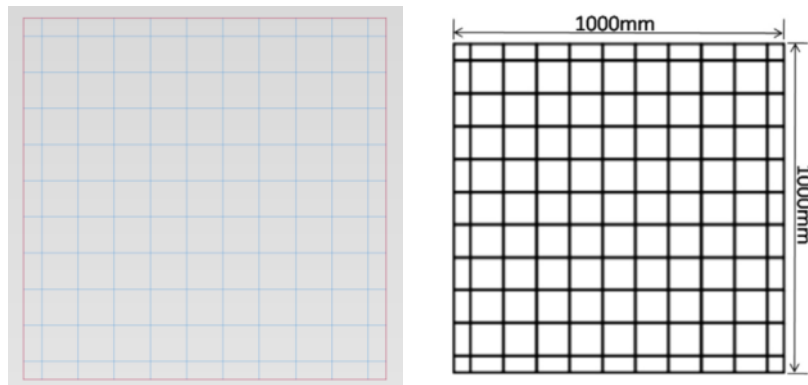
שקיעה מקסימאלית במרכז הפלטה של פלטת בטון בניסוי ERDC מול סימולציה (FEM) בתוכנת LS-DYNA (Thiagarajan and Johnson (2014)

6.2. מקרה 2: תגובה להדף+רסס (Blast+Fragments)

בסימולציה זו שוחזר ניסוי של Li, Y. ושותפיו (2020) נערך ניסוי של המכון הטכנולוגי של בייג'ינג. הניסוי של פיצוץ פגז 76 מ"מ עם מטען חומר נפץ 1.2 ק"ג-טני"ט בעובי דופן של 10 מ"מ במרחק של 1.6 מטר מפלטת בטון מזוין בעובי 40 מ"מ. סימולציה בוצעה ב-LS DYNA הכיול בוצעה בעזרת מודלי החומרים שנלקחו מניסוי ERDC. יתר על כן, הוא כולל חומרים ממאמר המכון הטכנולוגי של בייג'ינג.

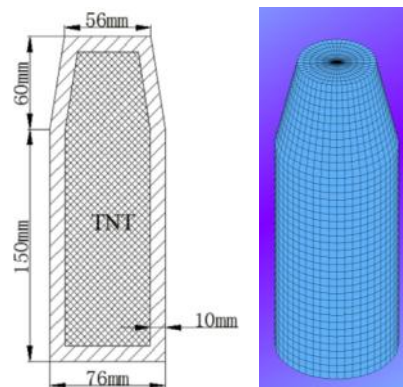


מידול מטרת הבטון בהתאם למאמר.

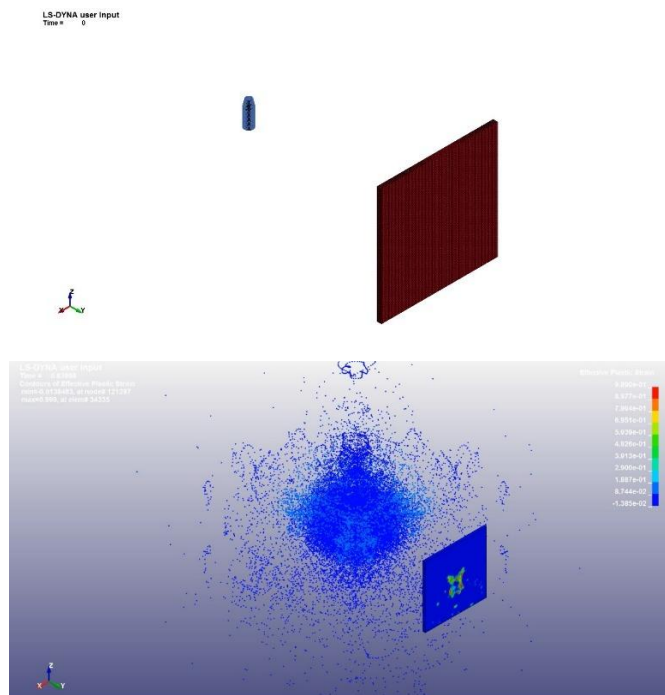


פלטת הבטון במודל נומרי עפ"י הנתונים במאמר (Li et al. 2020)

נתוני הפגז ומידול.



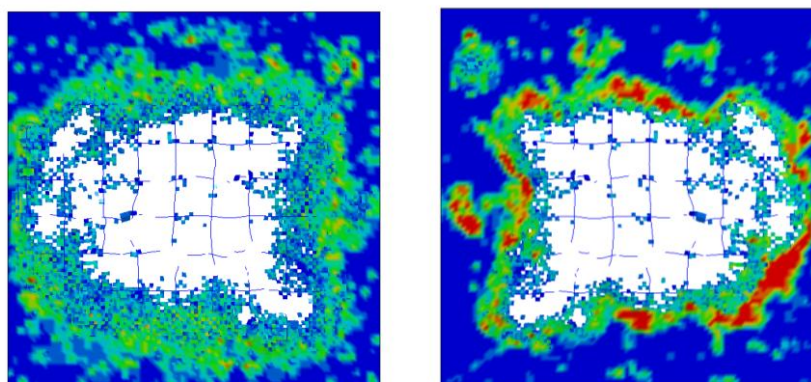
מידות הפגז (Li et al. 2020) ומידול באלמנטים סופיים LS-DYNA



התוצאות ממחישות את תוצאות הכיול שבוצע בתוכנת LS-DYNA מול הניסוי שנערך במכון הטכנולוגי של בייג'ינג. שיטת מידול של SPH כך שיש



מבט לפנים ולאחור של מטרת הבטון לאחר הניסוי (Li et al. 2020)

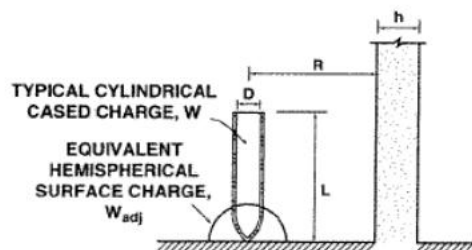


תוצאות מבט לפנים ולאחור של מטרת הבטון לאחר סימולציה נומרית בתוכנת Ls-Dyna

על מנת לתקף את תוצאות הסימולציה הנומרית נערכה השוואה מול מודל אנליטי-אמפירי עפ"י משוואות ממדריך US DoD UFC-03-340-02 (2008) רסס שניוני ורגמות . ניתן לראות התאמה וקורלציה טובה בין תוצאות הניסוי למודל הנומרי והמשוואות הקיימות , כאשר מתקבל עובי נדרש של 5 ס"מ על מנת פריצה של הקיר.

Non-contact Spall		Breach	
W (kg-tnt)	1.2	W (kg-tnt)	1.2
W (lb-tnt)	3.168	W (lb-tnt)	3.168
R(m)	1.6	R(m)	1.6
R(ft)	5.248	R(ft)	5.248
Za(ft/lb ^{1/3})	3.57	Za(ft/lb ^{1/3})	3.57
f'c	30	f'c	30
f'c	4350	f'c	4350
	-		
a	0.02511	a	0.028205
b	0.01004	b	0.144308
c	0.13613	c	0.049265
ψ	25.27	ψ	25.27
			35.13
m(ft)	0.16	m(ft)	0.15
h(m)	0.05	h(m)	0.05
76 mm bomb			
L	0.2	L	0.2
L(ft)	7.87	L(ft)	7.87
D	0.076	D	0.076
D(ft)	2.99	D(ft)	2.99
Cr	0.46	Cr	0.46
B	1	B	1
Wadj	1.47157	Wadj	1.47157

בדיקה נוספת של עובי נדרש לפריצה ושיחון עפ"י US DoD (2008) .



אילוסטרציה שמציגה את מיקום החימוש ביחס לקיר עפ"י US DoD (2008) .

6.3. מקרה 3: תגובה לחדירה בבטון (Penetration)

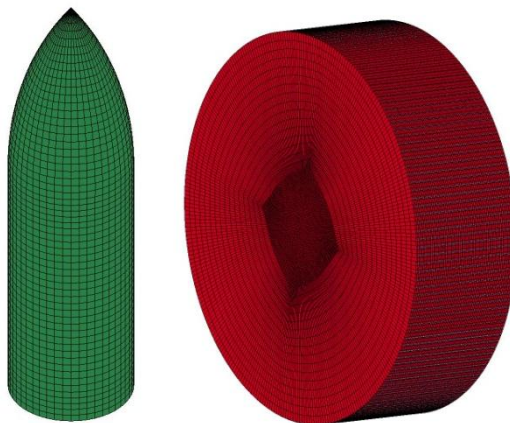
בסימולציה זו שוחזר ניסוי של סוכנות ההגנה והמחקר השבדי (Swedish defense research agency) עם אוניברסיטת סטוקהולם ביצעו סדרת ניסויים, אשר מתפרסת על עשור, ומחקר של חודרניים עשויים פלדה במטרות בטון שונות. כאשר אחד הניסויים הידועים הוא ירי פגז ארטילריה רוסי חודר ביצורים בקוטר של 152 מ"מ על מטרת בטון ללא זיון עטוף בפח 6 מ"מ. (הקידומת של MAT- (Material Models) המיוצגים זה הגדרות של מודלי החומר בתוכנת (LS-DYNA)



מטרת הבטון בניסוי ופגז 152 מ"מ

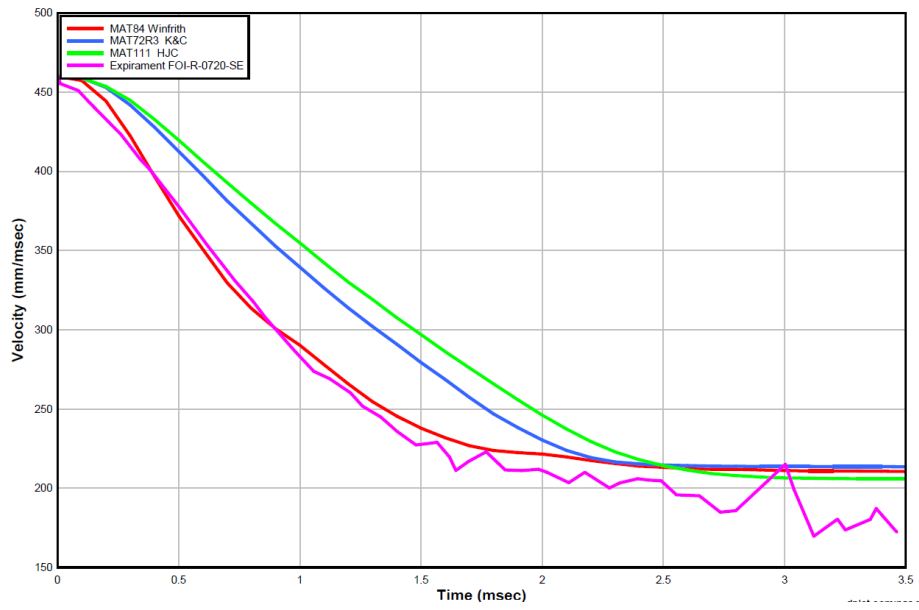


תוצאות הניסוי בירי הפגז



מידול המטרה והפגז 152 מ"מ

FOI-R-0720-SE
Concrete targets



תוצאות מהירות יציאה לפי מודלי חומר

מאחור	לפנים	
		MAT72R3
		MAT84
ben St Venant 	reen St Venant 	MAT111

7. דמוקרטיזציה של הידע

כיום, עם כניסתו של הקוד הפתוח יש כלים כמו OpenRadioss ו-SALOME PrePoMax מאפשרים לכל מהנדס ולכל סטודנט לבצע סימולציות מתקדמות, ללמוד את הפיזיקה ולבצע מחקר ללא עלות. החסם הטכנולוגי הוסר. כמו כן יש צורך להשלים פערים ידע ורקע לגבי ניסויים שנערכו בעבר על מנת לקבל מושג ותחושה הנדסית לגבי התוצאות שמתקבלו מתוכנות אלה.

8. סיכום: חזון לעתיד ההנדסה בישראל

מדינת ישראל היא מעצמה ביטחונית וטכנולוגית, אך בתחום ההנדסה האזרחית, הפער בין הידע שקיים בתחום המיגון ותופעות הדינאמיות (לאנליזות המחושבות ב Explicit Dynamics), והידע הקיים במשרדי התכנון, עדיין רחב. הטמעת יכולות סימולטיביות מתקדמות, בתכנון היא צעד הכרחי גם במשרדי התכנון וגם באקדמיה. המעבר מתכנון מבוסס "כללי אצבע" לתכנון מבוסס סימולציה מתוקפת ומכילת יביא לרמת הנדסה גבוהה יותר, והבנה של תופעות מגוונות.

הערה – ניתן להשתמש בתוכנות Implicit, לעומסי הדף להערכת תגובות מבנה, כתלות מטען ומרחק ובתנאי שהעומס נלקח כעומס מפורס אחיד. לאחר כיול והתאמת הבטון והפלדה. רצוי לעשות זאת לאחר עבודה מעמיקה עם רפרנס ידוע של תוצאות מאומתות.

אודות הכותב

תומי בורנשטיין, מהנדס מבנים המתמחה באנליזות מתקדמות ותכנון מיגון מבנים.
בוגר תואר ראשון בהנדסה אזרחית מכללת סמי שמעון.
בוגר תואר שני המחלקה להנדסה אזרחית באוניברסיטת בן גוריון.

1. **Hansson, H.** (2003). *Penetration in Concrete for Projectiles with $L/D=4$ to 9*. FOI-R--0720-SE. Swedish Defence Research Agency (FOI), Tumba, Sweden.
 - זהו הדוח המאוזכר במקרה בוחן 3 (עמ' 9-10) והגרף בעמוד 10 נושא את מספר הדוח: הערה
הזה. הדוח עוסק בניסויי חדירה של פגזי 152 מ"מ.
2. **Li, Y., Wu, C., Liu, H., & Zhang, J.** (2020). Damage characteristics of reinforced concrete slabs subjected to contact explosions of cased charges. *International Journal of Impact Engineering*, 142, 103588.
 - זהו המחקר המאוזכר במקרה בוחן 2 (עמ' 5-7) שנערך במכון הטכנולוגי של בייג'ינג: הערה
(Beijing Institute of Technology), העוסק בפיצוץ פגז 76 מ"מ על פלטת בטון.
3. **Thiagarajan, G., & Johnson, C. F.** (2014). Experimental and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Slabs under Blast Loading. *Journal of Structural Engineering*. (Also associated with U.S. Army ERDC reports).
 - זהו המחקר המאוזכר במקרה בוחן 1 (עמ' 4-5), העוסק בשימוש בסימולטור עומס פיצוץ: הערה
(LS-DYNA וכיול מודלי חומר בתוכנת BLS).
4. **U.S. Department of Defense (DoD).** (2008). *Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*. Washington, D.C.
 - TM 5-1300 מחליף את התקן הישן) המדריך המאוזכר בעמוד 8 להשוואה אנליטית-אמפירית: הערה
5. **Sammarco, E. L., & Halling, M. W.** (2014, March). Design for Blast and Seismic: Acknowledging Differences and Leveraging Synergies. *STRUCTURE Magazine*.^[1]
Retrieved from <https://www.structuremag.org/article/design-for-blast-and-seismic-acknowledging-differences-and-leveraging-synergies/>^[1](<https://www.google.com/url?sa=E&q=https%3A%2F%2Fwww.structuremag.org%2Farticle%2Fdesign-for-blast-and-seismic-acknowledging-differences-and-leveraging-synergies%2F>)

תוכנות וכלים (Software & Tools)

במסמך הוזכרו התוכנות הבאות כחלק מהסקירה הטכנולוגית:

- **LS-DYNA** (Ansys / LSTC) – תוכנת ה-Explicit במאמר.
- **Abaqus Explicit** (Dassault Systèmes).
- **OpenRadioss** – תוכנת פתוח לסימולציות Explicit.
- **Salome** – פלטפורמה לקוד פתוח (Pre-processing).
- **PrePoMax** – כלי קוד פתוח לאנליזות אלמנטים סופיים.
- **תוכנות סטנדרטיות (Implicit):** SAP2000, ETABS, STRAP, Midas Gen.