

31.05.2021

**לכבוד:**

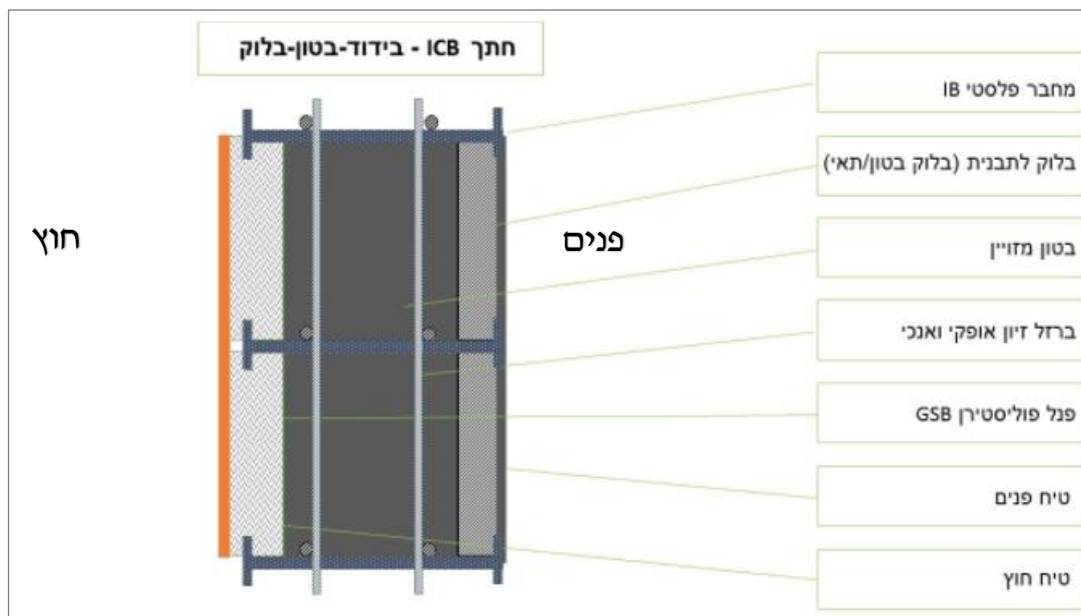
אילן ליאור – GSB סיסטמים

**הנדון: שיטת GSB - בחינת השיטה בהיבטי מיגון**

**1. כללי:**

טכנולוגיית GSB מבוססת על חיבור מכני של פנל מחומר מבודד (פוליסטירן) ובלוק צמנטי לכדי תבנית יציקה, בתווך שביניהם יוצקים בטון מזוין לכל גובה הקיר. כלל מרכיבי התבנית נשארים כחלק מהקיר ומהווים את שכבת הבידוד התרמי שעליה מבוצעות עבודות החיפוי והגמר.

בחתך קיר זה בצידו החיצוני של הקיר שכבת בידוד בעובי 6.5 ס"מ, עליה מבוצע הטיח. בצידו הפנימי של הקיר מותקן בלוק צמנטי בעובי 5 ס"מ, ובתווך שביניהם מבוצעת יציקת בטון של קיר בטון מזוין בעובי 15 ס"מ הכולל שתי רשתות זיון. לאחר היציקה הקיר משמש כקיר נושא



איור 1 - חתך עקרוני של הקיר



איור 2 – תבנית מורכבת לפני יציקה

## 2. אפקטי הפיצוץ:

בעת נפילה של רקטה, טיל או פצצת מרגמה מתרחשות בו זמנית מספר תופעות, אשר כל אחת מהן בנפרד עלולה להיות קטלנית לאנשים הנמצאים באזור הפגיעה, בין אם הם חשופים או נמצאים בתוך מבנים. ככל שהפריט שהתפוצץ גדול יותר וכבד יותר, כך האפקטים הנוצרים יהיו חזקים יותר. להלן סקירה של האפקטים העיקריים:

### א. הדף:

הדף הינו כינוי לגלים הנוצרים בפיצוץ של חומר נפץ ומתקדמים באוויר. ההדף הינו איום משמעותי ועלול להביא להרס של מבנים, חזיתות ולפגיעה באנשים אשר נמצאים בתוך המבנה בין אם ישירות מההדף החודר או אם ע"י העפה של רגמות ושברי מבנים לתוך המבנה.

### ב. רסיסים:

בפיצוץ של רקטה או פצצת מרגמה, מעטפת הפלדה החיצונית של הפריט מתרסקת ורסיסי הפלדה הנוצרים מתפזרים לכל עבר במהירויות גבוהות מאוד. בחלק מהרקטות בהן מבוצע שימוש, קיים רסס נוסף כגון כדוריות פלדה, מעויני פלדה, ברזל בניין חתוך ועוד. בנוסף, באירוע של פיצוץ בסמוך למבנה, נוצרים רסיסים משניים כגון שברי מבנה וזכוכיות, אשר מועפים גם הם במהירויות גבוהות. הרסיסים שנוצרים, עלולים לפגוע פגיעות קטלניות באנשים חשופים ואף במצבים מסוימים עלולים לחדור רכיבי מבנה.

### ג. פגיעה ישירה:

לעיתים הרקטה פוגעת ישירות במבנה. בעת הפגיעה מתרחשות התופעות שפורטו בסעיפים הקודמים וגורמות לנזק רב באזור הפגיעה. בנוסף, מתרחשת חדירה אינרטיית של "זנב" הרקטה אל תוך מבנה. עומק החדירה של ה"זנב" תלוי בזווית הפגיעה, מהירות הרקטה, קוטר הזנב, חוזק המשטח הנפגע ובפרמטרים נוספים.

### 3. שימוש בבטון מזויין לצרכי מיגון :

הבטון המזויין הינו שם לרכיבים אשר מתוכננים כשילוב של פלדת בניין היצוקה בתוך בטון. בטון מזויין הוא החומר הנפוץ ביותר המשמש לבניה של ביצורים ורכיבי מיגון שונים. לבטון מזויין יש יכולת עמידות טובה כנגד הדף של פיצוץ או פגיעה של קליעים ורסיסים במהירות גבוהה. השימוש בבטון מזויין לצרכי מיגון החל כבר בסוף המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20. מאז תחילת השימוש בבטון נבנו בונקרים וביצורים שונים מבטון מזויין בזכות הקלות היחסית בבנייתו ויכולת המיגון הגבוהה שלו.

### 4. יתרונות של קירות בטון בפני חדירת רסיסים ביחס לקירות בלוקים בעובי זהה :

הבטון נותן מענה מעולה בפני חדירת רסיסים. הקשיחות הגבוהה של הבטון שוחקת ומעוותת את הרסיס הפוגע ובנוסף מאיטה את מהירותו ע"י חיכוך עד כדי עצירה של הרסיס בתוך הקיר. חדירת רסיס בקיר בטון ניתנת לחישוב בשיטות רבות. בכדי לבחון את השפעת קירות הבטון נבחר נוהל חישוב לחדירת רסיס בכתב מדריך UFC-3-340-02 הנתון ע"י הנוסחאות הבאות :

$$X_f = 1.92 \times 10^{-3} W_f^{0.37} v_s^{0.9} \quad \text{for } X_f \leq 2d$$
$$X_f = 1.32 \times 10^{-6} W_f^{0.4} v_s^{1.8} + 0.695 W_f^{0.33} \quad \text{for } X_f > 2d$$

כאשר  $x_f$  הינו עומק חדירת הרסיס בקיר בטון,  $w_f$  הינו משקל הרסיס ו- $v_s$  היא מהירות פגיעת הרסיס בקיר.

מנוסחה זו ניתן לראות שככל שמהירות הרסיס גדולה יותר או ככל שמשקל הרסיס גדול יותר כך הרסיס יחדור עמוק יותר ולכן יש משמעות לעובי שכבת הבטון שממנה בנוי הקיר. ככל ששכבת הבטון תהיה גדולה יותר, כך היא תדע להתמודד עם רסיסים גדולים יותר ומהירים יותר.

בלוקי בטון חלולים הנפוצים בבניה של קירות חוץ ("בלוק שחור"), בנויים מחצץ ובטון שאינו מזויין ובעובי מצטבר של סנטימטרים בודדים של בטון. רסיסים שפוגשים בקירות מבלוק שחור, עלולים לחדור דרכו בגלל עובי הבטון הקטן יחסית שהרסיס פוגש בדרך.

בלוקים נוספים שנפוצים בשימוש לבניית קירות חוץ כגון בטון תאי מאושפר באוטוקלב או לבנים על בסיס סיליקה הינם חלשים וכמעט ואינם שוחקים או מעוותים את הרסיס בעת החדירה, מה שמאפשר חדירה עמוקה של הרסיס עד כדי מעבר דרך הבלוק.

מכאן, ניתן להסיק שבניית קירות חיצוניים מבטון, בדומה לקירות הנבנים בטכנולוגיית GSB תיתן מענה טוב משמעותית כנגד רסיסים חיצוניים הפוגעים בקיר וזאת לאור יתרונות הבטון בהתמודדות עם עצירת רסיסים.



איור 3 - פגיעת הדף בקירות במבנה שלוד (קונבנציונלי)





איור 4 - פגיעת רסס בקירות הבנויים בטון ללא שכבת בידוד (קונבנציונלי)



איור 5 - פגיעת רסס בקירות הבנויים GSB (כולל שכבת בידוד 6.5 ס"מ)

## 5. עמידות קירות כנגד הדף:

הבנויים מבלוקי בטון או מבלוקים אחרים אינם מתוכננים לעמוד בעומסים אופקיים משמעותיים בדומה לעומסים הנוצרים בפיצוץ של חומר נפץ. קירות אלו מתפרקים ושברים של הקירות מועפים אל תוך המבנה, לעיתים בעוצמה רבה. שברים אלו עלולים לגרום לפגיעות קטלניות בשהים בתוך המבנה.

לעומת זאת, קירות בטון מזויין עומדים היטב בעומסים אופקיים כדוגמת עומסי הדף. בחישוב שבוע, ראש קרב במשקל חומר נפץ של כ-1.5 ק"ג (לדוגמה פצמ"ר 120 מ"מ) פורץ קיר בלוקים במרחק נפילה של כ-1 מ'. לעומת זאת, פגיעה במרחק זהה מקיר בטון מזויין בעובי של 15 ס"מ לא תגרום לנזק או לסדיקה בקיר.

## 6. יציבות כוללת של מבנה:

צורת הבניה הנפוצה בישראל הינה מבנים "שלודים". מבנים אלה בנויים מרכיבי בטון שונים כגון: עמודים, קורות ותקרות בטון אשר בונים את ה"שלד" של המבנה. בצורת בניה זו, המעטפת החיצונית של המבנה מתבצעת על ידי מילוי החללים בחומרים קלים יחסית כגון בלוק שחור, איטונג או חומרים קלים אחרים.

הבניינים השלודים מתוכננים באופן שבו העמודים "אוספים" את כלל העומסים במבנה ומורידים אותם ליסודות המבנה.

במידה ומתרחשת פגיעה באלמנט קונסטרוקטיבי כגון קורה או עמוד, כדוגמת פגיעת רסיסים משמעותית מכרסמת משטח האלמנט או במקרה של ריסוק האלמנט מפגיעה ישירה או קרובה, האלמנט עלול להיחלש בצורה משמעותית ולא לעמוד בעומסים אשר אליהם הוא תוכנן במקור. מצב זה יגרום לכשל באלמנטים סמוכים כגון קורות, תקרה ועוד. במצב זה עלולה להתרחש התמוטטות חלקית או מלאה של המבנה (התמוטטות בתגובת שרשרת).

מבנים שבהם המעטפת בנויה מבטון, כלומר קירות נושאים, אינם רגישים לכשל מקומי של אלמנט מכיוון שבמקרה של פגיעה באלמנט מתקיימת במבנה "סכימה סטטית אלטרנטיבית" כלומר מערכת מבנית נוספת אשר לא תוכננה במקור ויודעת לקבל את העומסים ולהוריד אותם אל היסודות. כלומר גם במצב של פגיעה ישירה במבנה, הסיכוי לכשל משמעותי וסכנה ליציבות המבנה הינו נמוך ביותר.

**לאור האמור לעיל, למבנים הבנויים מקירות חיצוניים נושאים בדומה לשיטת GSB רמת עמידות גבוהה באופן משמעותי ביחס למבנים הבנויים מבניה שלודה הן להדף והן לפגיעה של רסיסים.**

## 7. עמידות של קירות מסוגים שונים כנגד פגיעה ישירה:

פגיעה ישירה הינה בדרך כלל אפקט הפיצוץ שהכי קשה להתגונן בפניו מכיוון שכוללת השפעה בו זמנית של הדף, רסיסים, חדירה, תאוצות ואפקטים נוספים.

לצורך השוואה של עמידות קירות מסוגים שונים לאפקט של פגיעה ישירה, יבוצע חישוב תיאורטי של פגיעת פצצת מרגמה (פצמ"ר) בקוטר של 120 מ"מ בקיר בטון, קיר בלוקים וקיר בטון הבנוי בטכנולוגיית GSB.

פצצת מרגמה בקוטר 120 מ"מ הינה נשק נפוץ מאוד המיוצר על ידי תעשיות צבאיות בכל רחבי העולם. הפצמ"ר מתוכנן לפזר רסיסים קטלניים בעת פגיעה במשטח קשיח (כגון אדמה או קיר) על מנת לפגוע באנשים הנמצאים במרחקים של עשרות מטרים מנקודת הפגיעה.

לרוב, שיגור הפצמ"ר מתבצע עד לטווח של כ-4 ק"מ אך ישנם גם דגמים משופרים בעלי טווח ארוך יותר (לרוב עד 7 ק"מ) ולכן הוא מהווה איום נפוץ ביישובי עוטף עזה.

קיימת שונות גדולה בין דגמים שונים המיוצרים ע"י מפעלים שונים. שונות זו שבאה לידי ביטוי באורך הפצצה, משקל חומר הנפץ, עובי מעטפת הפלדה ובסוג הרסס (פראי או מבוקר).

משקל חומר הנפץ בפצמ"ר זה נע בין 1.3 ק"ג ועד ל-4 ק"ג בדגמים המשופרים.

אורכו של הפצמ"ר (כולל המרעום) נע בין 650 מ"מ ל-850 מ"מ.

יכולות חדירת הפצמ"ר במשטחי בטון הינן נמוכות יחסית (ביחס לרקטה) וזאת מכיוון שמרבית הפצמ"ר מתרסק לרסיסים בעת הפגיעה וה"זנב" שנשאר הינו קטן וקל וזאת בשונה מרקטה אשר בנויה מראש קרב שמתנפץ ומנוע אשר בנוי מצינור כבד וארוך יחסית וממשיך בחדירה לאחר הפיצוץ של ראש הקרב.





איור 6 – חתך טיפוסי של פצמ"ר

החישוב המוצג במסמך זה מתבסס על נוהל חישוב מתוך UFC-3-340-02 ומיועד לחישוב של פיצוץ מגע או פיצוץ קרוב מאוד על גבי קירות בטון מזויין וקביעת העובי של הקיר.

#### להלן הנתונים שעל בסיסם בוצע החישוב:

- א. משקל חומר הנפץ שמתפוצץ 1.3 ק"ג, זהו המשקל של הפצמ"ר הנפוץ בעוטף עזה.
- ב. חישוב לפי משקל זה ישנה החמרה כי בפועל כמחצית מאנרגיית הפיצוץ "מתבזזת" על קריעת מעטפת הפלדה העבה של הפצמ"ר ולכן בחישוב אמיתי יש להתחשב בחצי מכמות חומר הנפץ בראש הקרב. בכדי להחמיר את החישוב הפחתה זו לא תבוצע.
- ב. המרחק מנקודת הפגיעה למרכז הכובד של החנ"מ יחושב על בסיס מידות של הפצמ"ר הקצר (650 מ"מ) וזאת על מנת לקרב את המטען לקיר ככל הניתן.
- ג. צורת המטען (בקירוב) הינה צלינדר
- ד. משקל מעטפת הפלדה של ראש הקרב הוא כ-3.5 ק"ג.
- ה. רמת הנזק המתוארת בהמשך מתייחסת לקיר בטון בעובי 15 ס"מ ולקיר בלוקים חיצוני בעובי של 20 ס"מ.

### ביצוע החישוב:

1) פיצוץ על קיר בטון/ בלוקים ללא שכבת קלקר - חישוב המרחק של המטען לקיר:

מרכז הכובד של חומר הנפץ נמצא בערך שליש מאורך הפצצה, אורך הפצצה הוא 650 מ"מ ולכן המרחק הוא 216 מ"מ מקצה המרעום (  $650/3=216$  ).

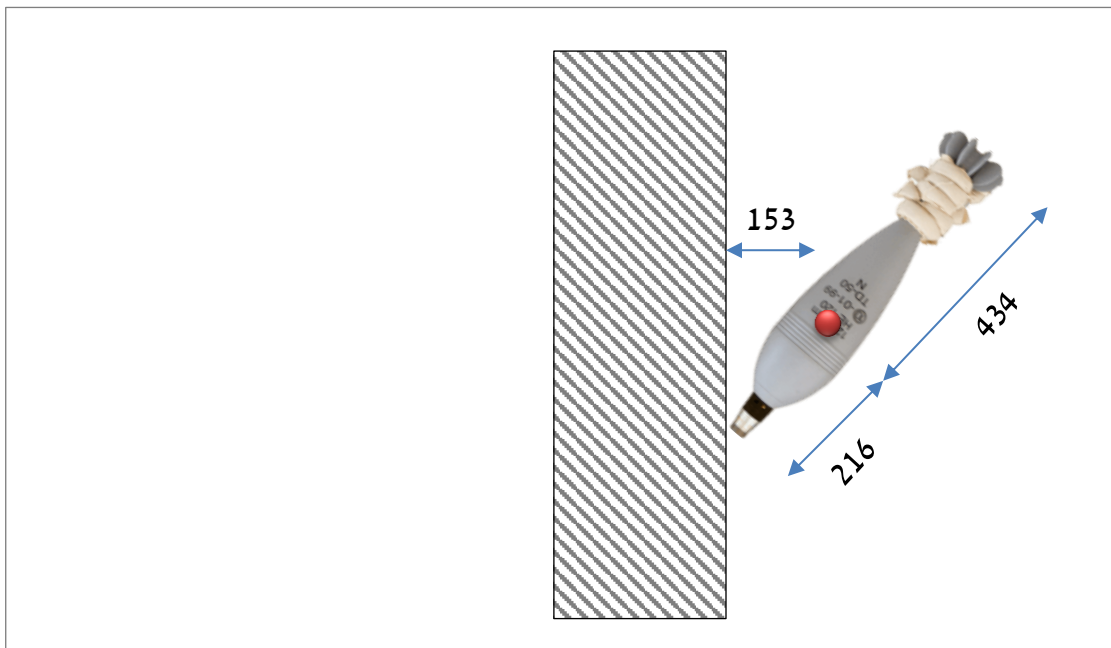
זווית הפגיעה הינה כ-45 מעלות, כלומר המרחק בין הקיר למרכז הכובד של המטען

$$r1 = \frac{216}{\sqrt{2}} = 153 \text{ mm}$$

2) פיצוץ על קיר בטון עם חיפוי קלקר בצידו החיצוני - חישוב המרחק של המטען לקיר:

עובי הקלקר הוא 6.5 ס"מ ולכן יש להרחיק את המטען ב-65 מ"מ:

$$r2=153+65 = 218 \text{ mm}$$



איור 7 - פגז 120 מ"מ – זווית פגיעה

**3) להלן תוצאות החישוב:**

רכיב	מרחק למרכז המטען (ס"מ)	תוצאת חישוב - עובי הקיר הנדרש למניעת פריצה (ס"מ)	תיאור רמת הנזק לקיר
קיר בטון 15 ס"מ	15.3	13.9	סדיקה בינונית – כבדה בצידו הפנימי של הקיר. תיתכן העפת שברי בטון אל תוך החלל
קיר בלוקים 20 ס"מ (עובי בטון מצטבר 8 ס"מ)	15.3	-	התפרקות של האזור הנפגע והעפת רגמות לתוך חלל המבנה
קיר בטון עם קלקר - <b>GSB</b> עובי הבטון בחתך 15 ס"מ	21.8	9	סדיקה קלה -בינונית בצידו הפנימי של הבטון. סביר להניח שסדיקה זו לא תיראה עקב החיפוי הפנימי של הקיר
קיר בטון עם קלקר - <b>GSB</b> עובי הבטון בחתך 20 ס"מ	21.8	9	סדיקה קלה מאוד בצידו הפנימי של הבטון. סביר להניח שסדיקה זו לא תיראה עקב החיפוי הפנימי של הקיר



איור מספר 8 - פגיעה ישירה בקיר בטון הבנוי בטכנולוגיית GSB

#### 8. סיכום ומסקנות:

- א. בדו"ח זה בוצעה השוואה של עמידות קירות בטון לקירות בלוקים כנגד אפקטי הפיצוץ השונים. בהתאם לממצאים בדו"ח זה ניתן לראות כי לקירות הבטון ישנם יתרונות רבים בהתמודדות עם אפקטי הפיצוץ.
- ב. לקירות הבנויים בטכנולוגיית GSB יתרון על קירות בטון פשוטים ובעלי אותו העובי וזאת מכיוון ששכבת הקלקר החיצונית מרחיקה את הפיצוץ במספר ס"מ בפגיעה ישירה ובכך מקטינה את הנזק הפוטנציאלי לקיר.
- ג. בניית מבנים שהמעטפת שלהם בנויה מבטון מזויין ושכבת בידוד עשויה להציל חיים - רמת ההגנה המתקבלת הינה גבוהה משמעותית ביחס לקירות מעטפת הבנויים בלוקים וכמו כן, העמידות הכוללת של המבנה טובה יותר בעת פגיעה באלמנט קונסטרוקטיבי. ולכן, במידה והשוהים במבנה לא הספיקו להגיע למרחב מוגן תקני בעת אירוע של נפילת רקטה, רמת השרידות שלהם במבנה הבנוי מבטון גבוהה מרמת השרידות במבנה בעל מעטפת בלוקים.
- ד. חשוב לציין שבניית המבנה מבטון אינה מחליפה את הצורך במרחב מוגן תקני בהתאם למפרטים ותקנות כפי שהוגדרו על ידי פיקוד העורף.

### אודות כותב הדו"ח:

**איגור סבצ'נקו** - מהנדס מיגון, בעל תואר ראשון בהנדסת בניין (קונסטרוקציה) עם התמחות במיגון מבנים מאוניברסיטת בן-גוריון ותואר שני במנהל עסקים. בעברו שירת במספר תפקידים בפקוד העורף לרבות תפקיד של ראש מדור מחקר ופיתוח במחלקת המיגון (רס"ן במיל'). כיום שותף בחברת א-ס.י.פ.ה בע"מ העוסקת בתחום המיגון וההיערכות לחירום. איגור מתמחה בחישובי מיגון, פיתוח מוצרי מיגון, תכנון וביצוע ניסויי פיצוץ ותכן מבנים מוגנים ייעודיים.

בברכה,

איגור סבצ'נקו

מהנדס מיגון 052-2479382