



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

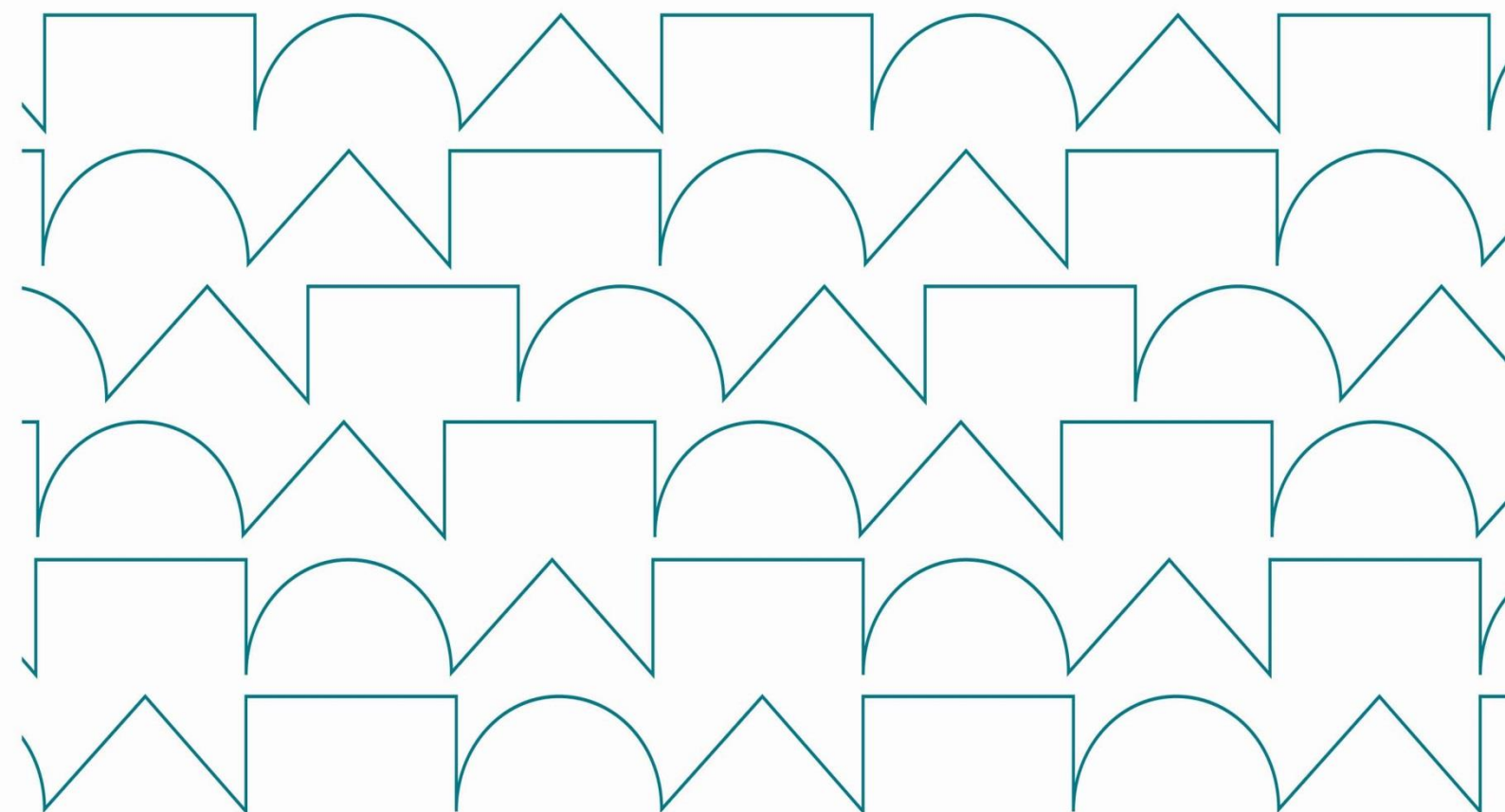


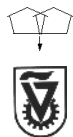
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה

עמידות בנייה אזרחית רגילה בפני איומים מלחמתיים-שלב א'

סטפן שוורץ דוד ינקלבסקי





מיסודם של Founded by

משרד הבינוי והשיכון MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית Faculty of Civil & Environmental Engineering

**NATIONAL
BUILDING
RESEARCH
INSTITUTE** המכון
הלאומי
לחקר
הבנייה

2009741

עמידות בנייה אזרחית רגילה בפני איומים מלחמתיים-שלב א'

אינג' סטפן שוורץ פרופ' דוד ינקלבסקי

מלווי המחקר: אינג' י. רזי אינג' מ. רנסקי אינג' ג. סוריה
סא"ל ב. ברוש דר' ד. שלו

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
הזמנה מס' 5258918

Copyright© 2010 by D. Z. Yankelevsky, S. Schwarz,
the Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקרים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון המכון הטכנולוגי לישראל – אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח או לצד ג' כלשהו, עקב דו"ח זה או בהקשר אליו, לרבות בשל יישום האמור בו.

תקציר

המחקר הנוכחי מהווה שלב א' של פעילות מחקרית ארוכת טווח המיועדת לבחון אפשרויות שונות של שיפור העמידות של הבנייה האזרחית הרגילה בישראל, במיוחד של הבנייה למגורים, בפני אימים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים. הדו"ח אינו מסווג מבחינה ביטחונית. לאור זאת, הוא אינו כולל מידע מסווג בסוגיות הנדונות. על כן, המידע המובא בו ביחס לאיומים המלחמתיים ולאיומי הטרור השונים ולגבי השפעותיהם החזויות מוצג באופן כללי והדיון בהם הוא בעיקרו איכותי.

בפרק 1 של הדו"ח כלולה סקירה כללית של הרקע לפעילות מחקרית זו, יחד עם פירוט מטרות המחקר ושיטת המחקר.

בפרק 2 של דו"ח המחקר מפורטים האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים כיום לגבי מדינת ישראל, כמו גם עיקרי ההשפעות ההרסניות השונות של האיומים השונים. כמו כן, פרק זה מתייחס להתפתחויות עתידיות אפשריות הקשורות להחמרה של האיומים המלחמתיים השונים.

בפרק 3 של הדו"ח מובאת סקירה מקיפה של מאפייני הבנייה האזרחית הרגילה המקובלת בישראל, לדורותיה השונים, עם דגש על בנייני מגורים. בפרק זה מובאת גם סקירה כללית של התפתחות החוקים, התקנות והתקנים במשך השנים בישראל, עם דגש על סוגיות הקשורות לתכן ולביצוע של בניינים אזרחיים רגילים, כמו גם בנושאים הקשורים למיגון האוכלוסייה האזרחית של מדינת ישראל בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים. הפרק כולל התייחסות לשיטות בנייה שהיו מקובלות בעבר והמקובלות כיום בישראל, לחומרי בנייה המשמשים לבניית בניינים אזרחיים רגילים ולתכונותיהם העיקריות, כמו גם לסוגי המערכות המבניות המיושמות בדרך כלל בבנייה אזרחית רגילה בישראל, עם דגש על בנייני מגורים.

פרק 4 של הדו"ח כולל התייחסות לתגובה החזויה של בניינים אזרחיים רגילים במקרה של היפגעותם עקב מימוש איום מלחמתי כלשהו. בפרק זה מוצגות דוגמאות רבות לאופי התגובה ולמידת החומרה של הינזקות בניינים אזרחיים רגילים, עם דגש על בנייני מגורים, במקרים של פגיעה ישירה או פגיעה קרובה בהם, על ידי רש"קי איום ישימים שונים, לרבות התייחסות לסיכונים של שריפה ושל הסכנה להתפתחות תהליכי התמוטטות בשרשרת של בניינים אזרחיים רגילים, שעלולים להתרחש כתוצאה ממימוש איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור שונים.

בפרק 5 של הדו"ח מוצגים כוונים אפשריים שונים היכולים לאפשר שיפור העמידות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים. אמצעים אלה כוללים תכנון ותכן מושכלים של בניינים מהסוג הנדון, תוך התחשבות במכלול האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים לגביהם, זאת בנוסף למכלול שיקולי התכנון והתכן הישימים האחרים. בין אמצעים אלה נכללים תכנון אורבאני מודע איומים כנ"ל, תכן אדריכלי והנדסי המתחשב באיומים אלה, היכול להשפיע על בחירת צורת הבניינים הנדונים ו/או של הרכיבים המבניים השונים המשולבים בהם, כמו גם על בחירת סוגי המערכות המבניות וסוגי המעטפות החיצוניות של הבניינים הנדונים, על בחירת חומרי הבנייה ושיטות הביצוע וכו'.

פרק 6 של דו"ח מחקר זה כולל מסקנות והמלצות המושתתות על ממצאי המחקר, עם דגש על מסקנות המתייחסות לאופי האיומים המלחמתיים ו/או איומי הטרור התקפים כיום והצפויים בעתיד. כמו כן, כלולים בפרק זה עיקרי המסקנות ביחס לעמידות החזוייה של בניינים אזרחיים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים וביחס לאפשרויות השונות של שיפור עמידות זו. בנוסף לכל אלה כלולים בפרק זה גם המלצות כלליות לגבי המשך פעילויות המחקר והפיתוח המיועדות לאפשר שיפור העמידות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, במיוחד בנייני מגורים, בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים.

תוכן עניינים

.....	תקציר
1	פרק 1 – מבוא
1	1.1 רקע
5	1.2 מטרות המחקר
6	1.3 שיטת המחקר
7	פרק 2 – איומים מלחמתיים ושימים והשפעותיהם
7	2.1 כללי
7	2.2 איומים מלחמתיים
12	2.3 איומי טרור
15	2.4 אפקטים עיקריים של כלי נשק ואמצעי חבלה שונים
15	2.4.1 כללי
16	2.4.2 הדף אוויר
22	2.4.3 רסס
24	2.4.4 הלם קרקע
26	2.4.5 מיכתוש
29	2.4.6 נגיפה
30	2.4.7 חדירה
32	2.4.8 שריפה
35	פרק 3 – מאפיינים עיקריים של הבנייה למגורים בישראל
35	3.1 כללי
35	3.2 מאפייני שיטות הבנייה העיקריות בבנייה למגורים בתקופות שונות
41	3.3 תכן בנייני מגורים לאור תקנות ותקנים
41	3.3.1 כללי
42	3.3.2 תכן השלד של בניינים מבטון מזויין
43	3.3.3 מיגון אוכלוסייה
47	3.4 מאפיינים מבניים עיקריים של הבנייה למגורים בישראל
57	3.5 מאפיינים עיקריים של מעטפות בנייני מגורים בישראל
61	פרק 4 – תגובת בניינים לפגיעה מלחמתית או פגיעת טרור
61	4.1 כללי
61	4.2 תגובת בניינים אזרחיים רגילים לפגיעה ישירה של רש"קים שונים
76	4.3 תגובת בניינים אזרחיים רגילים לפגיעה קרובה של רש"קים שונים
86	4.4 תגובת בניינים אזרחיים רגילים לפיצוץ של מכונית תופת
88	4.5 תגובת בניינים אזרחיים רגילים בשריפה
90	4.6 תגובת רכיבי זיגוג לעומסי הדף
92	4.7 התמוטטות בשרשרת של בניינים

פרק 5 – אפשרויות לשיפור עמידות בניינים אזרחיים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור...	101
5.1 כללי.....	101
5.2 השפעת תכנית בינוי על עמידות בניינים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור.....	102
5.3 השפעת צורת הבניין על עמידותו בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור.....	109
5.4 השפעת אופן ההעמדה של בניין על עמידותו בפני איומים מלחמתיים.....	111
5.5 השפעת הצורה של רכיבים מבניים על עמידותם בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור....	113
5.6 השפעת חומרי הבנייה על עמידות בניינים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור.....	114
5.6.1 רכיבי שלד הבניין.....	114
5.6.2 רכיבי מעטפת הבניין.....	118
5.6.3 חלונות וזיגוג.....	124
5.7 השפעת סוג המערכת המבנית על עמידות בניינים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור..	126
5.7.1 כללי.....	126
5.7.2 מערכות ביסוס.....	127
5.7.3 מערכות נושאות ומערכות הקשחה של בניינים.....	128
5.7.4 מערכות מבניות של רצפות/תקרות.....	129
פרק 6 – מסקנות והמלצות.....	131
6.1 מסקנות.....	131
6.2 המלצות.....	136
רשימת מקורות.....	139
Synopsis.....	

פרק 1 – מבוא

1.1 רקע

מדינת ישראל חשופה מיום הקמתה לאיומים מלחמתיים שונים. הגדרת איומים אלה אינה פשוטה כל עיקר, אולם פוטנציאל האיום גדל והוא משתנה בתלות בזמן ובתלות בזירה ובמיקום הגיאוגרפי. על מנת לתת מענה מיגוני נאות לאוכלוסייה האזרחית של המדינה בפני איומים מלחמתיים שונים עדכניים ואולי גם איומים חזויים, נחקק חוק ההתגוננות האזרחית [1] ונקבעו תקנות התגוננות אזרחית [2], [3], [4], [5], [6], אשר חייבו בעבר בניית מקלטים. המקלטים להתגוננות אזרחית נועדו להקנות מיגון בפני מתארי מתקפה המאופיינים בחדירת מטוסי אויב המטילים פצצות על יישוב אזרחי. בעקבות מלחמת המפרץ הראשונה בה שוגרו טילים ארוכי טווח למדינת ישראל, עודכנו תקנות ההתגוננות האזרחית, על מנת לתת מענה למאפייני האיום חדשים הנ"ל ובכלל זה משך ההתראה הקצר שעלול שלא להספיק על מנת להגיע מבעוד מועד למקלט הממוקם בבסיס הבניין. התקנות העדכניות מחייבות כיום בניית מרחבים מוגנים במרבית סוגי הבניינים הנבנים בישראל. גם תקנות התכנון והבנייה [8], שהותקנו מכוח חוק התכנון והבנייה [7], מחייבות שילוב אמצעי מיגון המפורטים בתקנות ההתגוננות האזרחית הישומות המוזכרות לעיל, בבניינים המיועדים ליעודים שונים, הנבנים בישראל.

לאור האופי השונה של האיומים המלחמתיים באזורי הארץ השונים, הדרישות המיגוניות המפורטות בתקנות ההתגוננות האזרחית השונות אינן אחידות, והן תלויות באזור הקמת הבניינים בהם אמורים המקלטים או המרחבים המוגנים להיות משולבים, או אותם הם אמורים לשרת. באופן עקרוני וכללי, חולקה המדינה לשני אזורים עיקריים, לאזור העורף, הכולל את מרבית שטחה של המדינה, ולאזורי קו העימות, הכוללים אזורים הסמוכים לגבולות המדינה עם מדינות עוינות. כמובן שההגדרות של אזורי קו עימות ודרישות המיגון הספציפיות לאזורי העימות השונים אינן קבועות, אלא משתנות, על פי ההתפתחויות הפוליטיות האזוריות ועל פי ההשתנות של האיומים המלחמתיים הישומים השונים.

תקנות ההתגוננות האזרחית המוזכרות לעיל אינן מתייחסות למעשה לבניינים בשלמותם, אלא הן מתמקדות ברכיבים המוגנים בלבד (מקלט או מרחב מוגן) ומגדירות את הדרישות המיגוניות הישומות לגביהם בלבד, לרבות דרכי הגישה אליהם והמילוט מהם. כל יתר חלקי הבניינים האזרחיים בישראל, הן ביישובים עורפיים והן ביישובי קו העימות, אינם נדרשים לשיקולי מיגון כלשהם ולפיכך הם יכולים להיבנות מחומרים שונים ובשיטות בנייה שונות ומגוונות. יוצאים מכלל זה הם רק בניינים המוגדרים כ"בנייה קשיחה", הכוללים מעטפת קשיחה מבטון מזויין מונוליטית יצוק באתר, בעלת בעובי מוגדר, הממוקמים באזורי קו עימות מסוימים (לדוגמה ברמת הגולן ובאזורים אחרים לאורך קו העימות בצפון הארץ). מעטפות של בניינים כאלה מוגנות באופן חלקי, אם כי ברמה פחותה מזו של מקלטים או של מרחבים מוגנים. בדרך כלל מדובר בבנייני מגורים ובבנייני ציבור שונים. בבנייני מגורים שונים הממוקמים ביישובי קו העימות בצפון הארץ, אשר לא נבנו על פי עקרונות הבנייה הקשיחה, נבנה בשלב מאוחר יותר חדר ביטחון

נוסף הצמוד לכל דירה (בדומה למרחב המוגן). חדר הביטחון בנוי אף הוא במתכונת "בנייה קשיחה". יש לזכור שדרישות המיגון המפורטות בתקנות ההתגוננות האזרחיות הישימות השונות נקבעו בהסתמך על קונצפציות מיגון של האוכלוסייה האזרחית בישראל, אשר עברו במהלך השנים שינויים שונים כתוצאה משינויים באיומים ומתוך שאיפה לעדכן ולהתאים את הפתרונות לאיומים השונים. ייתכן שגם בעתיד הן תאלצנה להשתנות, לאור שינויים חזויים באיומים המלחמתיים שבפניהם יהיה צורך להתמגן. תקנות אלה נועדו להבטיח מיגון נאות לאוכלוסייה האזרחית של המדינה, והן נקבעות מתוך ניתוח האיומים, דרישות המיגון ופתרונות ההנדסיים המתאימים לכך, ללא התייחסות להיקף הנזקים הכלכליים הישירים והעקיפים הצפויים ממימוש האיום המלחמתי.

מלחמת לבנון השנייה שהתרחשה בשנת 2006 חשפה את העורף בצפון הארץ לירי אינטנסיבי ומתמשך של מרגמות ורקטות מסוגים שונים, כגון רקטות "קטיושה". במלחמה זאת נוכחנו שוב ביעילות המיגונית של המקלטים באזורי קו העימות הסמוכים לגבול לבנון. גם המרחבים המוגנים באזורים אחרים בצפון הארץ, לרבות אזור המטרופולין של חיפה, אשר הותקפו באופן מתמשך על ידי ירי רקטות וטילים מסוגים שונים, נמצאו אמינים ויעילים. אזרחים בכל האזורים האלה, אשר שהו במקלטים או במרחבים מוגנים לא נפגעו. האזרחים שנהרגו או נפצעו במהלך המלחמה כתוצאה של פגיעת רקטות או טילים שונים בכל אזור צפון המדינה, שהו ברובם מחוץ לבניינים, ומקצתם בבניינים שלא היו מוגנים כלל. מצב דומה שורר גם ביישובי "עוטף עזה" החשופים במשך שנים לירי מתמשך של פגזי מרגמות ורקטות מסוגים שונים, כגון רקטות "קסאם" למיניהן. ישובים אלה נחשפו לירי מסיבי במיוחד של פגזי מרגמות, רקטות וטילים מסוגים שונים ששולחו מתחום רצועת עזה במהלך מבצע "עופרת יצוקה" בתחילת שנת 2009. מן הראוי להדגיש שירי זה היה מכוון לא רק נגד יישובי "עוטף עזה", אלא גם נגד יישובים וערים רבים אחרים בדרום הארץ (אשקלון, אשדוד, קריית גת, באר שבע וכו').

אירועים אלה ממחישים בעליל את האיום המשתנה בהתמדה. מאז מלחמת המפרץ חלו תמורות רבות במתארי האיום ובהתקפות בפועל על יישובים אזרחיים והן באו לידי ביטוי במלחמת לבנון השנייה ובירי מתמשך מרצועת עזה אל יישובי חבל עוטף עזה. התפתחות האיומים והשינויים במאפייני האיום מתבטאים בין השאר ב: הרחבת סוגי האיום; כמויות של רש"קים שניתן לשגר, גודליהם וטווחיהם; הרחבת הגורמים העוינים שעלולים לפעול מעבר למדינות העימות; העיתוי שבו עלולה להיות פעולה אל מול העורף והיא אינה מוגבלת עוד לאירוע מלחמה כוללת או לעימות מקומי המוגבל בזמן, בהיקף ובעוצמה; אזורי הארץ החשופים לפגיעה אפשרית וכו'. חלק מסוגיות אלה נידון ביתר פרוט גם בהמשך דו"ח זה. לאור זאת נדרשת בחינה מחודשת ועדכנית של האיומים והסיכונים, וכן של האפשרויות והפתרונות שיבטיחו את איתנות העורף האזרחי של המדינה ויצמצמו את הפגיעה ואת הנזק.

האיום על העורף האזרחי של ישראל הפך להיות כולל מבחינת טווחי הנשק וכתוצאה מכך חל גידול ניכר בשטח המדינה המאויים. במתארי איום קודמים היה תיחום ברור בין ישוב קדמי ליישוב עורפי, אולם לאור הנתונים העדכניים מתבקשת בחינה מחודשת של ההבחנה הזאת.

הגידול הניכר בכמויות ראשי הקרב למיניהם (טילים, רקטות, פגזים וכו') שעלולים להיות משולחים לעבר מדינת ישראל באירוע מלחמתי, משנים את תמונת המלחמה ולכן גם את שיקולי המיגון. אחד ההיבטים שיש לקחת בחשבון הוא אפשרות המניעה ומשמעותה, דהיינו היכולת לצמצם את כמות הרש"קים המשולחים או המגיעים בסופו של דבר לתחומי יישוב כלשהו במדינת ישראל. זהו אחד ההיבטים הראויים לטיפול, בעיקר כאשר מדובר בריבוי פגיעות אפשריות, ולכך מוקדשים מאמצים בכוונים שונים, כדוגמת פיתוח אמצעים לזיהוי רש"ק לאחר שיגורו והשמדתו בטרם פגיעתו במטרה. לאמצעים אלה יש נתוני תפקוד ומן הסתם מגבלות ביצוע, ובודאי גם תג מחיר נכבד. במשוואה הכללית יש לקחת את אלה בחשבון, אולם מבחינת מחקר זה, אין הם בתחום מומחיותנו ורק מטעם זה לא נדון בהם.

כמות גדלה של רש"קים הפוגעים בתשתית הבנויה גורמת לנזקים ישירים לבנייה לא מוגנת ולתכולתה, בהיקף שעלול להיות גדול מאד. במהלך מלחמת לבנון השנייה ובמהלך מבצע "עופרת יצוקה", נגרמו נזקים בהיקף כספי גדול (במאות מיליוני שקלים). יש להדגיש כי עלולים להתרחש מתארי מלחמה חמורים יותר מאלה המוזכרים לעיל, הכרוכים בהיקף פגיעות ניכר יותר ולכן גם משמעותיות כלכליות כבדות יותר. מעבר לנזק הכלכלי יש לקחת בחשבון את הסיכונים המוגברים לפגיעות בנפש, במיוחד של אנשים הנמצאים בחללים של "בנייה רכה" בלתי מוגנת בעת מלחמה כזאת. היקף הנפגעים והמשמעותיות הכלכליות של הנזק מעלות גם כן מחדש את שאלת מידת ההתאמה של קונצפציות המיגון הקיימות כיום בישראל, אשר מתמקדות בהגנה על חיי האזרחים בלבד לרמת איום מסוימת ומתעלמות מהנזקים היכולים להיגרם לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים, כתוצאה של פגיעה מלחמתית בהם.

היבט אחר נוגע למשכה של המלחמה ולמקום התרחשותה. מלחמות קודמות התנהלו בחזית, בגבולות מדינת ישראל ומעבר להן, והמטרה האסטרטגית הייתה להעביר את המלחמה כמה שיותר מהר אל מעבר לגבולות המדינה, ובכל מקרה לסיים את המלחמה בפרק זמן קצר ככל האפשר. מלחמות עתידיות עלולות להיות ממושכות, מטרידות את העורף האזרחי של המדינה והיכולת לסיימן בהקדם ו/או להעבירן אל מעבר לגבולות המדינה תהיה מוגבלת ואולי בלתי אפשרית. על כן, המשך תפקודו של העורף האזרחי וקיום המשך "שיגרת החיים" הם יעד חשוב שצריך לקחת אותו בחשבון.

מחקר זה מתמקד בהיבטי הבנייה בלבד. בניינים אזרחיים מהווים את יסוד הציביליזציה, הם מקום משכנה של האוכלוסייה בין אם למגורים, לחינוך, למסחר ותעשייה, לבילוי והנאה, או לכל פעילות אזרחית אחרת. הבנייה מהווה נדבך חשוב בתשתית הכלכלית של המדינה. הינזקותם האפשרית החמורה של בניינים רבים כתוצאה של פגיעה עוינת בהם, במהלך פעולות מלחמתיות מסוגים שונים (הפגזות ארטילריות, הפצצות אוויריות, ירי מרגמות, רקטות ו/או טילים מסוגים שונים), או עקב התקפות טרור (פגיעה בבניינים אזרחיים באמצעות מטעני חבלה, מכוניות תופת ואף מטוסים), עלולה לגרום לפגיעה בחיי אדם ולנזקים כלכליים ניכרים. היבטים פרטניים שונים של הנזק האפשרי לרכיבי בנייה קיימת לסוגיה בהשפעות מלחמתיות שונות הם נושא

לבחינה ניסויית ועיונית של פיקוד העורף, המופקד על הנושא. גם חוקרי המכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון עוסקים בשנים האחרונות במחקרים שונים הקשורים לסוגיות הנדונות. בהקשר זה חשוב לציין את החשיבות הרבה של הדיון בכל הרמות, החל מהתנהגות פרט חיבור ורכיב בנייה בודד ועד להתנהגות המבנה השלם וגם מכלול מבנים. לדוגמה ניתן לציין פעילות מחקרית בנושא שילוב מרחבים מוגנים במבני קומות לשיפור עמידותם ברעידות אדמה ובאיומים מלחמתיים [9], [10], ואומנם מגדל המרחבים המוגנים הוא הרכיב המוגן היחיד בבניין אזרחי רגיל, אולם שילובו במבנה מקנה למבנה כולו יכולת עמידה משופרת באיומים שונים. גם היבטים של מאפייני פגיעה חמורה במבנים ודרכי התמודדות עמה נדונו במסגרת מחקר [11], וניתן להבין כי אירוע כשל מקומי מחייב התגייסות מיטבית של רכיבי מבנה נוספים במאמץ לגשר על הכשל המקומי ולמנוע המשך התפתחות הכשל לאירוע כשל כולל. ניתוח ההתנהגות הכוללת של בניינים לרבות במצבים של כשל חלקי או כולל חיוני מבחינות שונות כמו שיפור העמידות של הבנייה האזרחית בהשפעות קיצוניות (מלחמתיות וסיסמיות), צמצום סכנת ההתמוטטות הכוללת של מבנים, שהתולדה הישירה מכך היא הקטנה ניכרת מספר הנפגעים כתוצאה מכשל המבנה, שיפור ההיערכות של גורמי החילוץ וההצלה בכל הקשור לאירועים אפשריים של פגיעה חמורה בבניינים וכו'. ההיקף הגדול יחסית של פגיעות בבניינים אזרחיים בצפון הארץ במהלך מלחמת לבנון שנייה ובדרום הארץ במהלך מבצע "עופרת יצוקה", ממחיש את היקף הבעיה שעלולה בעתיד להיות גדולה עוד הרבה יותר ומחזק את הצורך בהמשך פעילויות מחקריות בסוגיות אלה ובהרחבתן לתחומי מחקר נוספים שטרם נחקרו, במטרה לגבש כלים יעילים לצמצום הנזק ולשמירת בטחון האוכלוסייה.

אחד הנושאים החשובים שיש צורך לחקור ולבחון בהקשר לכל האמור לעיל, הוא מידת העמידות של המערכת המבנית הכוללת, הבלתי מוגנת, בפני השפעות של פגיעה מלחמתית ובאיזו מידה ניתן לשפר את תפקודה במטרה לצמצם את הנזק ולהגדיל את עמידותה הטבעית. השגת יעד כזה תהווה תרומה חשובה לחוסן הטבעי של הבנייה על כל מרכיביה ותאפשר התמודדות טובה יותר ומענה טוב יותר לשאיפה להמשך תפקוד ולשמירת שיגרה, היא תסייע לצמצום הנזקים וכמובן של הנפגעים בנפש וייתכן שניתן יהיה לקבל באמצעותה גם הגנה טבעית טובה יותר של האנשים (והתכולה) גם אם אינם מספיקים להגיע לחלל המוגן. לשם כך יש צורך להעריך את הנזק הצפוי למעטפות בניינים ומערכות מבניות מקובלות כתוצאה מפגיעות מלחמתיות מסוגים שונים, בתלות בסוג השלד והמעטפת ומאפייניהם החומריים והמבניים. מחקר כזה מטבעו הוא רחב היקף וצעד ראשון בכוון זה הוא נושא מחקר זה. הניסיון המעשי הקיים כיום בישראל ביישום חומרי בנייה שונים ושיטות בנייה שונות מראה שתגובת מערכות מבניות ומעטפות בניין מסוגים שונים של בניינים בלתי מוגנים לפגיעה מלחמתית בהם אינה אחידה. מידת החומרה של הפגיעה, היקפה ומידת הסיכון הנגרמת לאנשים השוהים בבניינים בלתי מוגנים רגילים עקב התרחשותה, תלויים במידה בלתי מבוטלת במאפייני המערכת המבנית והמעטפת של בניינים אלה. קיימים סוגים שונים של מערכות מבניות ושל מעטפות בניינים בלתי מוגנים, שהתנהגותן הכוללת בהשפעת איומים מלחמתיים המוזכרים לעיל צפויה להיות טובה יותר מזו של סוגים אחרים של מערכות מבניות ושל מעטפות בניין. בשלב הנוכחי של המחקר נערכו ניתוחים איכותיים וכמותיים של התנהגות חזויה של מערכות מבניות ושל מעטפות בניינים אזרחיים בלתי מוגנים

מקובלים, בהשפעת איומים מלחמתיים חזויים שונים, לצורך הערכת אופי והיקף הינזקות הצפויה. במסגרת השלב הנוכחי של המחקר נבחנו הערכות אלה גם מול נתוני פגיעה והינזקות בפועל של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים בצפון הארץ במהלך מלחמת לבנון השנייה ובדרום הארץ במהלך מבצע "עופרת יצוקה", בהסתמך על מידע בנדון זמינים שונים. כמו כן, נערכו הערכות אלה גם בהסתמך על ממצאים של ניסויי פיצוץ הנערכים על ידי שלטונות פיקוד העורף זה שנים רבות, תוך שיתוף פעולה עם גורמי ביטחון ומחקר נוספים, לרבות המכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון. מטבע הדברים דו"חות של ניסויים אלה הינם לרוב מסווגים ברמה זו או אחרת, דבר המקשה לעתים על הפצת המידע הכלול בהם בציבור. במסגרת המחקר הנוכחי נוצלו מקורות מידע זמינים שונים ונמנענו מכלול בדו"ח זה התייחסות למידע מסווג כלשהו. בשלבים הבאים של המחקר ניתן יהיה לפתח הצעות לשינויים ו/או לשיפורים בבנייה כדי לצמצם את הנזק הצופי בהם וכן ניתוחים הנדסיים-כלכליים של המשמעות הכלכליות (הישירות והעקיפות) של הנזק ושל ההשקעות במיגון שיוכלו לשמש בסיס לקבלת החלטות מושכלות לגבי פתרונות המיגון והטיפול הכולל במבנים אזרחיים רגילים. ברור כי כל התמודדות עם שינויים ושיפורים במערכת המבנית צריכה לקחת בחשבון את מכלול ההיבטים השימיים מעבר לסוגיית המיגון ובכללם סוגיות בטיחות, תפקוד, קיים וכו'.

1.2 מטרות המחקר

המטרה העיקרית של המחקר הנוכחי הינה להתניע פעילות מחקרית רב שלבית המכוונת לבחינת ההתנהגות החזויה של מערכות מבניות ושל מעטפות בניינים אזרחיים בלתי מוגנים, בהשפעת איומים מלחמתיים ישימים שונים, לצורך הערכת חומרת הנזקים הצפויים למערכות מבניות ולמעטפות בניין מסווגים שונים, ולהיקפם. מטרה חשובה נוספת של המחקר הנוכחי הינה גיבוש המלצות, לכל הפחות ברמה הראשונית, ביחס ליישום סוגים מועדפים של מערכות מבניות ושל מעטפות בניין בבנייה אזרחית חדשה, ואף המלצות ראשוניות בקשר לאפשרויות שדרוג שונות של מערכות מבניות ומעטפות בניינים אזרחיים קיימים. פעילות מחקרית זו מיועדת לאפשר שיפור הערכות העורף האזרחי של המדינה לעמידה בפני איומים מלחמתיים חזויים שונים, תוך צמצום סיכוני היפגעות האוכלוסייה האזרחית וצמצום היקף הנזקים הכלכליים הישירים והעקיפים, שעלולים להיגרם כתוצאה של פגיעה מלחמתית אפשרית בישובים אזרחיים של המדינה. יישום של מסקנות המחקר הנוכחי וההמלצות שגובשו על סמך ממצאיו יוכל יתרום תרומה משמעותית לשיפור הערכות העורף האזרחי של המדינה להתמודדות עם תוצאות אפשריות של פגיעה מלחמתית בו, להגברת הבטיחות והביטחון של אזרחי המדינה ולצמצום הנזקים הכלכליים הישירים והעקיפים כתוצאה של פגיעה מלחמתית אפשרית בבניינים אזרחיים ברחבי המדינה. בנוסף לכל אלה, יישום המלצות הנ"ל ישרת בלי ספק גם את ההיבטים הכוללים יותר של עמידות המבנה בניינים אזרחיים רגילים בהשפעות קיצוניות ובכלל זה ואולי בראש ובראשונה את העמידות הסיסמית של הבנייה האזרחית בישראל.

1.3 שיטת המחקר

המחקר הנוכחי הינו עיוני. במסגרתו נערכו סקירה וניתוח איכותי וכמותי של איומים מלחמתיים חזויים שונים, בהתבסס על מקורות מידע גלויים. במהלך העבודה קיימנו שיתוף פעולה עם גורמים מקצועיים של פיקוד העורף. כמו כן, נערכו סקירה וניתוח ביקורתי של תכונות אופייניות של מערכות מבניות ושל מעטפות בניין מסוגים שונים הנמצאים בשימוש בבנייה האזרחית בישראל, עם דגש על בנייני מגורים. על בסיס סקירות וניתוחים אלה נערכו ניתוחים איכותיים וכמותיים של התנהגות חזויה של מערכות מבניות ושל מעטפות בניין מסוגים שונים, לצורך הערכת חומרת הנזקים הצפויים להיגרם להן, כתוצאה של פגיעות מלחמתיות אפשריות שונות, ולהיקפם. הערכות אלה נבחנו באופן חלקי גם מול ממצאים מתועדים של פגיעות מלחמתיות בבניינים אזרחיים רגילים, במיוחד במהלך מלחמת מפרץ הראשונה, מלחמת לבנון השנייה ובמהלך מבצע "עופרת יצוקה". בהסתמך על ניתוחים אלה סווגו סוגי המערכות המבניות ומעטפות בניין הנדונות, בתלות במידת עמידותן בפני איומים מלחמתיים שונים וגובשו המלצות עקרוניות לגבי יישומן המעשי. על בסיס ממצאי השלב הנוכחי של המחקר הוכנו גם המלצות לגבי שלביו הבאים, שבמסגרתם ניתן יהיה לבחון בחינה מעמיקה יותר של ההערכות לגבי התנהגות חזויה של מערכות מבניות ושל מעטפות בניין מסוגים שונים, בשפעת האיומים המלחמתיים החזויים, הן הנוכחיים והן עתידיים חזויים, מול ממצאים מעובדים של תוצאות הפגיעות מלחמתיות בפועל בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים מסוגים שונים. בשלבים הבאים של המחקר ניתן יהיה לגבש הצעות לשיפור התכנון והביצוע של מבנים אזרחיים רגילים במטרה לצמצם את הנזק והגדיל את המיגון הטבעי ואת העמידות שלהם בהשפעות מלחמתיות, ולנתח על בסיס שיקולי עלות-תועלת, את האפשרויות האופטימליות ליישום מערכות מבניות ומעטפות בניין מסוגים שונים בבנייה אזרחית חדשה וביחס לשדרוג אפשרי של מערכות מבניות ושל מעטפות בניינים אזרחיים קיימים בישראל. לאור כל זאת, שלב המחקר הנוכחי כולל את הפעילויות העיקריות שלהלן:

1. ניתוח איכותי וכמותי של איומים מלחמתיים חזויים שונים.
2. סקירה וניתוח איכותי של סוגי מערכות מבניות ומעטפות בניין הנפוצות בבנייה אזרחית בישראל.
3. ניתוח איכותי וכמותי של התנהגות חזויה של מערכות מבניות ומעטפות בניין מסוגים שונים, בהשפעת איומים מלחמתיים שונים.
4. הערכת חומרת הנזקים הצפויים למערכות מבניות ולמעטפות בניין מסוגים שונים, כתוצאה של פגיעות מלחמתיות אפשריות שונות בהן.
5. סווג מערכות מבניות ומעטפות בניין הנדונות לפי מידת עמידותן בפני איומים מלחמתיים שונים.
6. הכנת המלצות ראשוניות עקרוניות לגבי יישום מעשי של מערכות מבניות ושל מעטפות בניין מועדפות מבחינה מיגונית.
7. הכנת המלצות לגבי שלבי המחקר הבאים.
8. הכנת דו"ח מסכם של שלב הנוכחי של המחקר.

פרק 2 – איומים מלחמתיים ישימים והשפעותיהם

2.1 כללי

מדינת ישראל חשופה במשך כל שנות קיומה לאיומים מלחמתיים שונים. חלק מאיומים אלה אינם חדשים כלל, אולם הם מתעצמים, ואילו חלקם בהחלט חדש ונוסף על אלה הקיימים, כך שמכלול האפשרויות לפגיעה ולנזק מתרחב והולך באפשרויות וגדל מאד בכמויות ובפרמטרים אחרים, כמו כמות חומר הנפץ ברש"ק, צורת השיגור, טווח המעוף וכו'. מבחינת טווח המעוף וכן בגלל האופי של הגורם המפעיל (לא רק מדינות עימות אלא גם גורמי טרור למיניהם), גם ההסתברות לעיתוי העימות גדלה וטווח הכיסוי של אזורי הארץ השונים גדל והולך. להבדיל מאיומים מלחמתיים של העבר הלא רחוק, האיומים העכשוויים והעתידיים אינם מתמקדים לאזורים הסמוכים לגבולות המדינה בלבד, כגון גבול הצפון או גבול רצועת עזה, אלא מכסים למעשה את כל שטח המדינה. בנוסף לאיומים המלחמתיים מדינת ישראל חשופה גם לאיומי טרור שונים. יש צורך להתייחס למכלול האיומים האלה בעת ניתוח האיום הכולל ותולדותיו.

המידע ביחס לאיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים השונים הינו לרוב מידע מסווג, בעיקר כאשר מדובר בפרטים ותחזיות לעתיד, וכן ככל שנדונים קריטריונים ספציפיים להגנת מבנה או מתקן מסוימים. כך מתייחסים לנתונים אלה הן בארץ והן בחו"ל. מאחר שמדובר בניתוח איכותי במידה רבה וכמותי כללי בחלקו, ולאור מגבלות נתונים כאמור לעיל, מתייחס הדו"ח למסגרת מידע קיים וחופשי בלבד.

2.2 איומים מלחמתיים

קיימים סוגים רבים ומגוונים של איומים מלחמתיים שעלולים להיות חלק מתרחיש התקפה על אזורים מיושבים במדינת ישראל, במטרה לפגוע באנשים, בתשתיות הבנויות ובבניינים. מחקר זה מתייחס לאיומים קונוונציונליים בלבד (מטעני חומר נפץ הארוזים במעטפת מתכתית בדרך כלל), ולהשפעתם על בניינים מסוגים שונים (בנייני מגורים, בנייני ציבור, מבני תעשייה וכו'), עם דגש מיוחד על בנייני מגורים. מבחינת האיומים המלחמתיים הללו ניתן להבדיל באופן עקרוני בין פגיעה ישירה בבניין לבין פגיעה קרובה, במרחק כלשהו ממנו. בהסתמך על מקורות מידע בלתי מסווגים, לדוגמא כך א' של מדריך לתכנון מבנים מוגנים בהוצאת מפקדת קצין הנדסה ראשי [14] ומקורות אחרים [16], ניתן לסווג את האיומים הקונוונציונליים של ראשי הנפץ המשולחים לעבר מטרה כלשהיא למשפחות שונות של ראשי קרב (רש"קים), על פי:

- אופן ההכוון ו/או הנחיית הרש"ק אל המטרה;
- אופן השיגור של הרש"ק אל המטרה;
- טווח השיגור של הרש"ק;
- גודל הרש"ק – סוג וכמות חומר הנפץ ברש"ק;
- יכולת החדירה של הרש"ק;

מבחינת אופן ההכוון ו/או הנחיית הרש"ק אל המטרה ניתן להבדיל בין:

- רש"קים תלולי מסלול, כגון פגזי מרגמה, רקטות וטילי קרקע-קרקע (טק"ק);
- רש"קים שטוחי מסלול, כגון פגזי טנקים;
- רש"קים בלתי מונחים;
- רש"קים מונחים;

מבחינת אופן השיגור של הרש"ק אל המטרה ניתן להבדיל בין:

- פגזי ארטילריה;
- פצצות מרגמה (פצמ"רים);
- רקטות;
- פצצות אוויר;
- טילי אוויר-קרקע;
- טילי קרקע-קרקע (טק"ק) בעלי טווחים שונים;
- טילי שיוט;
- טילים בליסטיים;

מבחינת טווח השיגור של רש"קים אל המטרה ניתן להבדיל בין:

- טווח שיגור קצר;
- על הרש"קים המשוגרים מטווח קצר, בדרך כלל של קילומטרים ספורים, ניתן למנות פגזי ארטילריה, פצצות מרגמה, רקטות שונות (לדוגמא קטיושות קצרות טווח, קסאמים וכו') – איור 2.1, ואולי גם פצצות אוויר המושלכות ממטוסים וטילי אוויר-קרקע המשוגרים ממטוסים.



איור 2.1: רקטת "קסאם 2" קצרת טווח

- טווח שיגור בינוני ;

על הרש"קים המשוגרים מטווח בינוני, בדרך כלל של מספר עשרות קילומטרים, ניתן למנות פגזי ארטילריה ארוכת טווח, רקטות וטילי קרקע-קרקע (לדוגמא טילי קרקע-קרקע ששוגרו על ידי החיזבאללה במהלך מלחמת לבנון השנייה לעבר אזור חיפה, או טילי קרקע-קרקע ששוגרו על ידי ארגוני טרור שונים מרצועת עזה במהלך מבצע "עופרת יצוקה" לערים שמעבר לאזור עוטף חבל עזה, כגון אשדוד, קריית גת, באר שבע וכו') – איורים 2.2, 2.3, וכן גם טילי אוויר-קרקע מונחים היכולים להיות משוגרים ממטוסים ממרחק של כמה עשרות קילומטרים מהמטרה.

- טווח שיגור ארוך ;

בין רש"קים המשוגרים לטווח ארוך, של מאות ואף של אלפי קילומטרים, ניתן למנות טילי שיוט וטילים בליסטיים, כדוגמת טילי ה- SCUD העיראקיים – איור 2.4, שפגעו במקומות שונים ברחבי המדינה במהלך מלחמת המפרץ הראשונה, כמו גם טילים בליסטיים חדישים יותר, בעלי טווחים מוגברים ודיוק רב יותר, המיוצרים ו/או הנמצאים כיום בידי מדינות עוינות שונות, כגון איראן וסוריה.



איור 2.2 : רקטות 122 GRAD מ"מ



איור 2.3 : רקטות 302 מ"מ לטווח בינוני



איור 2.4 : טיל בליסטי SCUD

מבחינת גודל הרש"ק – סוג וכמות חומר הנפץ ברש"ק ניתן להבדיל בין :

- פגזי ארטילריה, פצצות מרגמה ורקטות קלות הכוללים בדרך כלל קילוגרמים ספורים של חומר נפץ. חומר הנפץ יכול להיות מסוגים שונים.
- פגזי ארטילריה כבדה, פצצות מרגמה כבדות, רקטות, טילי אוויר-קרקע וטילי קרקע-קרקע הכוללים כמה עשרות קילוגרמים של חומר נפץ. חומר הנפץ יכול להיות מסוגים שונים.
- פצצות אוויר, טילי אוויר-קרקע, טילי קרקע-קרקע, טילי שיוט וטילים בליסטיים, היכולים לכלול בין מאות קילוגרמים עד מספר טונות של חומר נפץ. חומר הנפץ יכול להיות מסוגים שונים.

מבחינת יכולת החדירה של הרש"קים למטרה, במקרה של פגיעה ישירה, ניתן להבדיל בין :

- רש"קים ללא יכולת ממשית של חדירה למטרות קשות (כמו מטרות מבטון מזויין בעלות עובי מתאים), המתפוצצים ברגע הפגיעה במטרה ;
 - רש"קים בעלי יכולת חדירה מסוימת, אשר עלולה להיות מוגבלת במקרה של פגיע במטרות קשות (כדוגמת מטרות מבטון מזוין). אלה יכולים להיות פגזי ארטילריה, רקטות, פצצות אוויר וטילים מסוגים שונים.
 - רש"קים בעלי יכולת חדירה למטרות בטון מזויין, לרבות למטרות בטון מזויין מוקשחות ומוגנות (פגזי ארטילריה, פצצות אוויר וטילי אוויר-קרקע חודרי ביצורים) ;
- מן הראוי לציין שיכולת החדירה המוזכרת לעיל של הרש"קים השונים תלויה במספר גורמים, כדלהלן :
- סוג המרעום (מרעום מיידי או מרעום השהייה) ;
 - מבנה הרש"ק (גיאומטריה, עובי המעטפת, צורה וקשיות אף הרש"ק, מיקום המרעום-קדמי או אחורי וכו') ;
 - מהירות הפגיעה של הרש"ק (מאות עד אלפי מטרים בשנייה) ;
 - זווית הפגיעה של הרש"ק במטרה (ככל שהפגיעה קרובה יותר למצב של פגיעה ניצבת למישור המטרה יכולת החדירה של הרש"ק טובה יותר) ;

מידע מפורט על האיומים המלחמתיים השונים, לרבות מידע על האפקטים העיקריים של רש"קים שונים, ניתן למצוא במקורות מידע מתאימים (למשל [16]). ניתן להיעזר לצרכים אלה גם בתוכנות מתאימות, כגון תוכנת Conwep האמריקאית.

בעבר, לא כל האיומים האלה היו ישימים ובודאי שלא באותה מידה לכל אזורי המדינה. כפי שצוין בפרק 1 לעיל, בעבר היה מקובל לחלק את שטחה של מדינת ישראל לשני אזורים עיקריים מבחינת איומים מלחמתיים ישימים, קרי אזורי "קו עימות" לאורך גבולות המדינה עם מדינות עוינות ול"עורף המדינה". באזורי "קו העימות" מכלול האיומים המלחמתיים המפורט לעיל היה ישים בעבר וישים גם כיום. לעומת זאת באזורי "עורף המדינה" היה מקובל בעבר להתייחס רק לאיומי הפצצות אוויריות. גישה זאת השתנתה כבר לאור לקחי מלחמת המפרץ הראשונה שבמהלכה שוגרו עשרות טילים בליסטיים ארוכי טווח מעיראק לישראל, אשר כווננו ופגעו באזורים אורבאניים מאוכלסים בצפיפות במרכז המדינה, במיוחד באזורי המטרופולין של תל אביב וחיפה. הדבר גרם לטשטוש, לפחות חלקי, של ההבחנה שהייתה קיימת בעבר בין האיומים המלחמתיים הישימים עבור אזורים של "קווי העימות" לאלה הישימים לשובי "עורף המדינה". לאור לקחים אלה שונו קונצפציות מיגון האוכלוסייה האזרחית של המדינה וכיום במקום מקלטים על קרקעיים או תת קרקעיים הממוקמים בחלקם התחתון של בניינים או בקרבתם, מסופק המיגון

באמצעות מרחבים מוגנים הממוקמים בכל הקומות של בניינים חדשים. הצטיידות מתמשכת של מדינות עוינות ובמיוחד של ארגוני טרור שונים (חיזבאללה, חמס וכו') ברקטות וטילים מסוגים שונים כמפורט לעיל ובמיוחד רקטות וטילים היכולים להיות משוגרים לטווחים בינוניים ואף ארוכים מטשטשת עוד יותר את ההבדלים שהיו קיימים בעבר מבחינת הבחנה בין אזורים של "קווי העימות" ל"שולי" "עורף המדינה". למעשה מלחמת המפרץ הראשונה ובעקבותיה מלחמת לבנון השנייה ומבצע "עופרת יצוקה" הוכיחו שבמקרה של עימות מלחמתי, אף מוגבל בהיקפו, מרבית שטחה של המדינה חשוף לפגיעה ללא הבדלים ממשיים או מהותיים בין ישובים של "קווי העימות" לישובים של "עורף המדינה". על כן, יש להתייחס למכלול הישים של האיומים המלחמתיים כאשר דנים במיגון האוכלוסייה האזרחית ובצמצום הפגיעה החזויה בתשתיות הבנויות של המדינה בכל שטחה. כך למשל יש להתייחס בכל אזור צפון הארץ, לרבות באזור המטרופולין של חיפה, לאפשרויות של פגיעה מסיבית ע"י פגזי ארטילריה ארוכת טווח היכולים להיות משוגרים מלבנון, או רקטות (קטיושות, גראדים וכו') בעלי טווח שיגור מתאים היכולות להיות משוגרות מלבנון או מספינות השטות בים התיכון, כמו גם באפשרויות פגיעה באזורים אלה באמצעות רש"קים כבדים (פצצות אוויר, טילי אוויר-קרקע, טילי קרקע-קרקע ארוכי טווח או טילי שיט ארוכי טווח). מן הראוי לציין שמדינות עוינות וגם ארגוני טרור שונים מצטיידים כל הזמן וצוברים כמויות עצומות של אמצעי לחימה שונים, כמפורט לעיל ויש ביכולתם לשגר אלפי רש"קים לאזורים מאוכלסים שונים ברחבי המדינה. יכולת זאת רק עלולה לגדול בעתיד. יש צורך להבטיח את מיגון האוכלוסייה האזרחית בפני השפעות אלה, ולצמצם את ההשפעות ההרסניות של פגיעה מסיבית אפשרית בתשתיות הבנויות של המדינה וביניהם בניינים רגילים בלתי מוגנים מסוגים שונים, כגון בנייני מגורים, בנייני ציבור. מבני תעשייה וכו'.

כפי שצוין לעיל, פגיעה קרובה או ישירה בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים, באמצעות רש"קים מסוגים שונים, עלולה להתרחש לא רק במקרה של עימות מלחמתי כולל, אלא גם בתקופות אחרות, שבהן מופגזים אזורים מאוכלסים שונים ע"י ארגוני טרור הפועלים מעבר לגבולות המדינה, כדוגמת תקופות של הפגזת יישובי הגליל העליון ע"י החיזבאללה מדרום לבנון, ו/או הפגזות של ישובי חבל "עוטף עזה" על ידי חמס וארגוני טרור אחרים הפועלים ברצועת עזה.

על סמך הניסיון משנים אחרונות ניתן להעריך כי אזורים אורבאניים צפופי אוכלוסין ותשתיות בנויות בכל רחבי המדינה עלולים להוות מטרה טקטית ואף אסטרטגית, הן במקרה של עימות מלחמתי עם מדינה/ות עוינת/ות ואף במקרה של עימות מוגבל עם ארגוני טרור הפועלים מלבנון או מרצועת עזה. על כן, יש לתת את הדעת לסכנה זו, הן מבחינת הבטחת מיגון נאות לאוכלוסייה האזרחית של המדינה והן מבחינת צמצום היקפי הנזקים הישירים והעקיפים העלולים להתרחש כתוצאה של פגיעה מסיבית באזורים מיושבים שונים של המדינה.

2.3 איומי טרור

מדינת ישראל חשופה מאז הקמתה לא רק לאיומים מלחמתיים כמפורט בסעיף 2.2 לעיל, אלא גם לאיומי טרור. הסיבות העיקריות לכך הינן:

- אי הכרה בישראל כמדינה ריבונית ועצמאית במזרח התיכון על ידי הפלסטינאים ועל ידי חלק ממדינות ערב;
- העדר יכולת הפלסטינאים, לרבות ארגוני הטרור הפלסטינאים והאחרים, להתמודד עם ישראל במלחמה קונוונציונלית חזיתית;
- קיום ארגוני טרור עצמאיים שונים, באזור ובמרחק ממנו, שהם מכווני מטרה לחסל את "הישות הציונית" כהגדרתם, במזרח התיכון, בלי גבולות ובלי הגבלות.

על כן, ארגוני הטרור הפלסטינאים ו/או תומכיהם מנסים לפגוע בישראל באמצעות פיגועי טרור שונים. פיגועים אלה מופנים לרוב נגד האוכלוסייה האזרחית, בעיקר במקומות ריכוז של אנשים רבים. ארגוני הטרור האלה ראו עד כה כמטרתם העיקרית הסבת מספר גדול ככל האפשר של אבדות בנפש לאוכלוסייה האזרחית של ישראל, תוך מחשבה שהדבר יגרום בסופו של דבר לערעור חוסנה של המדינה.

בשנים האחרונות איומי הטרור הפכו לבעיה כלל עולמית חמורה. ארגוני טרור רבים במקומות שונים בעולם, בעיקר ארגונים מוסלמיים פונדמנטליסטיים קיצוניים, פועלים בשיתוף ובנפרד ומנסים לערער את היציבות העולמית, על ידי פעולות טרוריסטיות ראוותניות שונות, בעיקר במדינות אירופה ואמריקה הצפונית והדרומית, אולם גם במדינות שונות באסיה ובאפריקה, וכמובן גם בישראל. על מנת להשיג את מטרותיהם, הם נעזרים בארגונים מקומיים ובקשרים מקומיים שונים, ומנצלים את הניידות הרבה האפשרית כיום ואת היכולות הרחבות של התקשורת הכלל עולמית, ואמצעים טכנולוגיים מתקדמים, כגון האינטרנט, תקשורת סלולארית, תקשורת לוויינית וכו'. הם מנסים ליצור פיגועי ראוות בעלי תהודה תקשורתית רחבה ככל הניתן, לתזמן פיגועים בו זמניים מסונכרנים (לדוגמא הפיגועים כנגד מערכת התחבורה הציבורית בלונדון בקיץ 2005), ו/או על ידי פיגועים עתירי נפגעים – "מגה" פיגועים (לדוגמא הפיגועים הקטלניים במגדלי מרכז הסחר העולמי בניו יורק ובבניין משרד ההגנה האמריקאי - הפנטגון בווינגטון בספטמבר 2001). מעבר להשגת היעד התקשורתי המבוקש והפגיעה המוראלית במדינות השונות בהן מתרחשים פיגועי טרור כאלה, הם מיועדים לגרום גם לנזקים כלכליים ישירים ועקיפים חמורים ככל הניתן. לאור כל אלה, תשתיות לאומיות שונות, לרבות בניינים ו/או מבנים הנדסיים חשובים, עלולות להוות מטרה ולהיות חשופות לפיגועי טרור מסוגים שונים. גם בניינים רגילים עלולים להיפגע כתוצאה של פגיעה טרוריסטית כזו או אחרת, גם אם הם אינם מהווים את המטרה העיקרית של הפגיעה (למשל פגיעה בבניינים רגילים כתוצאה של פיצוץ מכונית תופת ברחוב הומה אדם).

המידע בקשר לסוגים האפשריים של איומי טרור ישימים לתשתיות בנויות הינו פחות מגובש מאשר המידע הקיים ביחס לאיומים מלחמתיים, המפורט בסעיף 2.2 לעיל. כמו במקרה של איומים מלחמתיים, גם המידע ביחס לאיומי הטרור הישימים הינו לרוב מסווג. בהתבסס על מקורות מידע זרים בלתי מסווגים, ניתן לסווג את איומי הטרור השונים, היכולים להיות ישימים לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדלהלן:

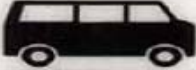
- פיצוץ של מטען חבלה במשקל מוגבל (בדרך כלל מספר קילוגרמים של חומר נפץ תיקני או מאולתר בסמוך לבניינים הנדונים או בתוכם) (במידה שמחבל מצליח להיכנס אליהם);
- פיצוץ של מטען חבלה במשקל מוגבל (בדרך כלל מספר קילוגרמים ספורים של חומר נפץ תיקני או מאולתר בצמוד לרכיבים מבניים רגישים של בניינים, כדוגמת מטעני חבלה מוצמדים לעמודים של בניין בעל קומת עמודים פתוחה);
- פיצוץ של מטען חומר נפץ המובל במכונית פרטית המשמשת כמכונית תופת, היכולה לשאת בתא המטען שלה כמה מאות קילוגרמים של חומרי נפץ תקיניים או מאולתרים (בדרך כלל 200-400 ק"ג). הפיצוץ יכול להתרחש בקרבת הבניין הנבדק, או בתוכו (למשל בקומת קרקע פתוחה או בחניון תת קרקעי הממוקם מתחת לחלק העילי של הבניין);
- פיצוץ של מטען חומר נפץ המובל במכונית מסחרית המשמשת כמכונית תופת, היכולה לשאת בתא המטען שלה כמה מאות עד אלפי קילוגרמים של חומרי נפץ תקיניים או מאולתרים (בדרך כלל 800-1800 ק"ג). הפיצוץ יכול להתרחש בקרבת הבניין הנבדק, או בתוכו (למשל בקומת קרקע פתוחה או בחניון תת קרקעי הממוקם מתחת לחלק העילי של הבניין);
- פיצוץ של מטען חומר נפץ המובל במשאית קטנה עם תא מטען סגור, המשמשת כמכונית תופת, היכולה לשאת בתא המטען שלה כמה אלפי קילוגרמים של חומרי נפץ תקיניים או מאולתרים (בדרך כלל 4000-5000 ק"ג). הפיצוץ יכול להתרחש בקרבת הבניין הנבדק;
- פיצוץ של מטען חומר נפץ המובל במשאית גדולה עם תא מטען סגור או במיכלית, המשמשת כמכונית תופת, היכולה לשאת בתא המטען או במיכל שלה כמה אלפי קילוגרמים של חומרי נפץ תקיניים או מאולתרים (בדרך כלל 10000-14000 ק"ג). הפיצוץ יכול להתרחש בקרבת הבניין הנבדק;
- פיצוץ של מטען חומר נפץ במשאית סמי-טריילר, המשמשת כמכונית תופת, היכולה לשאת כמה עשרות אלפי קילוגרמים של חומרי נפץ תקיניים או מאולתרים (בדרך כלל 20000-30000 ק"ג). הפיצוץ יכול להתרחש בקרבת הבניין הנבדק;
- נגיפה של משאיות כבדות בעמודים של בניין הממוקם בקרבת דרכי תחבורה;
- שריפות היכולות להיגרם כתוצאה מהתלקחות או מפיצוץ של מיכלית המשנעת חומר דליק/נפיץ;

בטבלה 2.1 להלן מוצגים נתונים בלתי מסווגים, בהסתמך על פרסומים מחו"ל, ביחס למכוניות תופת. הנתונים הללו יכולים להיות ישימים, בתנאים ומגבלות מסוימים, גם לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים. השאלה איזה מבין האיומים הינם בעלי הסתברות גבוהה יותר להתממש, ומה הם האיומים (גם אם הם שונים מאלה המוצגים בטבלה 2.1) אשר יש להתחשב בהם בניתוחי הסיכון השונים, הינה עדיין פתוחה ומחייבת דיון משותף עם גורמי הביטחון המוסמכים. בדרך כלל בניתוחי איומים על בניינים, מבנים ותשתיות נהוג להתחשב במספר תרחישי איום אפשריים, תוך התחשבות במידת החומרה של הנזקים העלולים להיגרם כתוצאה ממימוש איום זה או אחר

ובהסתברות המוערכת להתממשותו של כל איום שכזה. בנוסף לאיומים המוזכרים לעיל, אשר יכולים להיות ישימים לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, מקורות זרים מתייחסים לעתים גם לאיומים אחרים אשר עלולים לסכן בניינים ומבני תשתית שונים, למשל התנגשות מכוונת של מטוס בבניין גדול וחשוב במיוחד. בגלל ישימותו הקטנה של איום כזה לגבי בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, אין התייחסות לגביו במסגרת המחקר הנוכחי.

טבלה 2.1: נתונים בסיסיים בקשר למכונת תופת מסוגים שונים – על פי נתוני

הסוכנות האמריקאית ATF

ATF	VEHICLE DESCRIPTION	MAXIMUM EXPLOSIVES CAPACITY
	COMPACT SEDAN	500 Pounds 227 Kilos (In Trunk)
	FULL SIZE SEDAN	1,000 Pounds 455 Kilos (In Trunk)
	PASSENGER VAN OR CARGO VAN	4,000 Pounds 1,818 Kilos
	SMALL BOX VAN (14 FT BOX)	10,000 Pounds 4,545 Kilos
	BOX VAN OR WATER/FUEL TRUCK	30,000 Pounds 13,636 Kilos
	SEMI-TRAILER	60,000 Pounds 27,273 Kilos

2.4 אפקטים עיקריים של כלי נשק ושל אמצעי חבלה שונים

2.4.1 כללי

גם בנוגע לאפקטים ההרסניים של כלי נשק/רש"קים ו/או של אמצעי חבלה שונים, מרבית המידע הינו מוגבל ומסווג. מידע חלקי, שעשוי להספיק לצורכי הערכות ראשוניות לפחות, ניתן למצוא גם במקורות מתאימים שונים (לדוגמא ב- [16]), או בחלק א', של מדריך לתכנון מבנים מוגנים שבהוצאת מפקדת קצין הנדסה ראשי [14].

האפקטים העיקריים הנובעים מפיצוץ רש"ק קונוונציונלי ו/או של אמצעי חבלה שונים שבשימוש ארגוני טרור הינם:

- הדף אוויר (איום ישים לגבי פיצוץ באוויר)
- רסס (איום ישים כאשר מדובר בפיצוץ באוויר)

- גלי הלם המועברים בחומר בו אירעה פגיעת הרש"ק (למשל: הלם קרקע כאשר מדובר בפיצוץ לאחר חדירת הרש"ק בקרקע או הלם בבטון כאשר מדובר בפיצוץ מגע או בפיצוץ לאחר חדירה חלקית בתווך בטון)

- מיכתוש

- נגיפה

- חדירה

- שריפה

מן הראוי להדגיש שחומרת האפקטים השונים של פיצוץ רש"קים או של אמצעי חבלה שונים תלויה בעיקר בגורמים הבאים: סוג חומר הנפץ, כמות חומר הנפץ ומרחק הפיצוץ מהמטרה (פגיעה ישירה במטרה או פגיעה קרובה במרחק כלשהו).

רקע תיאורטי מקיף בקשר לאפקטים שונים של פיצוצים נמצא בספרו של Henrych [17], או בספרם של Baker et al. [18]. לצורך הערכת האפקטים החזויים של כלי נשק/רש"קים ו/או של אמצעי חבלה שונים ניתן להיעזר במדריכים מתאימים (למשל [16], [20]). ניתן להסתייע גם בתכנות שונות, כגון ConWep, או בתכנות הידרודינמיות מתקדמות מתאימות.

תאור קצר של המאפיינים השונים של אפקטים אלה, עם דגש על ההשפעות ההרסניות שלהם על בניינים בלתי מוגנים רגילים, במיוחד בנייני מגורים הנפוצים בישראל, מוצג בסעיפים שלהלן.

2.4.2 הדף אוויר

המאפיינים העיקריים של הדף אוויר הנגרם ע"י פיצוץ חומר נפץ הינם:

- עמיסה דינמית אימפולסיבית בעלת עוצמה גבוהה ומשך פעולה קצר מאוד;
- פירוס עומסים בלתי אחיד, כאשר עוצמת הלחץ בכל נקודה תלויה במיקומה ביחס למוקד הפיצוץ, בתנאים הגיאומטריים של המכשול שעליו פועל הדף האוויר ובזמן שחלף מאז תחילת הפיצוץ;
- הגדלה (הגברה) של לחצי ההדף הפועלים על מבנים בהשוואה ללחצי הדף באוויר חופשי ללא מכשולים באותו מיקום, עקב החזרה/ות של גלי ההדף מפני משטחים קשיחים של המכשולים - המבנים החשופים להדף;

עוצמת הדף האוויר בנקודה מוגדרת כלשהי במרחב תלויה בעיקר בסוג ובכמות חומר הנפץ המתפוצץ ובמרחק הנקודה הנדונה ממוקד הפיצוץ. גורמים נוספים שיש להם השפעה על עוצמת לחצי הדף אוויר, אם כי במידה פחותה מהפרמטרים הנ"ל, הינם צורת המטען המתפוצץ (מטען כדורי, חצי כדורי, צילינדרי וכו'), וכן גם הלחץ הברומטרי וטמפרטורת האוויר השוררים באזור בעת הפיצוץ.

ככל שכמות חומר הנפץ הינה גדולה יותר והמרחק בין מוקד הפיצוץ למבנה הינו קטן יותר השפעות הפיצוץ הן חמורות יותר. פיצוץ באוויר מקיים תנאי דמיות, המבוטאים בפרמטר המכונה מרחק מקונם (scaled distance) הנתון בנוסחה 4.1 בפרק 4 להלן.

נמצא שפיצוצים שונים (כמויות שונות של חומר נפץ המתפוצצות במרחקים שונים מנקודת הייחוס) המאופיינים על ידי מרחק מקונם זהה גורמים ללחצי הדף אוויר (ולפרמטרים נוספים) זהים בנקודת הייחוס. לפיכך, הקטנת מרחק הפיצוץ פי שניים תחייב הקטנת כמות חומר הנפץ פי שמונה, על מנת לקבל את אותם מאפייני פיצוץ. באופן כללי ניתן לקבוע שככל שהמרחק המקונם של הפיצוץ קטן יותר עוצמת לחצי ההדף הנגרמים על ידו הינה גדולה יותר.

שימוש במרחק מקונם מאפשר גם הצגת תוצאות של אנליזות שונות של תגובת מבנים הנדסיים שונים או של רכיביהם, וכן גם תוצאות ניסויים לגבי השפעות פיצוץ, בצורה מוכללת, שאינה מפרשת את האיום הספציפי (סוג הרש"ק ו/או כמות חומר הנפץ המתפוצץ ומרחק מוקד הפיצוץ מהמבנה הנבדק), ולכן ניתנת להצגה בפרסומים בלתי מסווגים.

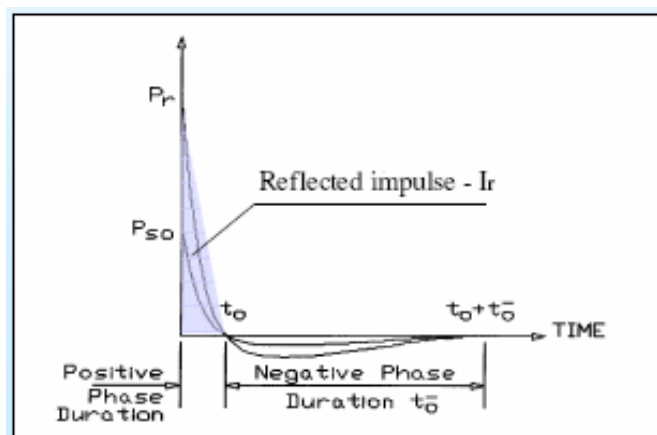
כאשר גל לחץ הנגרם ע"י פיצוץ כלשהו מתפשט ממוקד הפיצוץ ופוגע במישור של גוף קשיח, באופן אידיאלי זו יכולה להיות חזית של בניין, מוחזרים גלי ההדף מהמכשול. הגל המוחזר גדול בעוצמתו מהגל הפוגע, ועוצמה מוגברת זאת מורגשת על ידי גוף המכשול. מידת ההגברה תלויה בזווית הנטייה של המכשול ביחס לכוון ההתקדמות של גל ההדף באוויר החופשי. כאשר הקו הדמיוני המקשר בין מוקד הפיצוץ לנקודה מוגדרת נתונה על פני המבנה הינו ניצב לפני המבנה החשופים להדף, הלחץ המוחזר המוגבר הינו מרבי, ומידת ההגברה תהיה תלויה במרחק המקונם בלבד. כאשר הקו הדמיוני הנ"ל נטוי בזווית מסוימת ביחס לכוון המישור, מידת ההגברה תהיה קטנה יותר ותלויה בזווית הנ"ל ובמרחק המקונם.

סוגיות הקשורות ללחצי הדף באוויר נחקרו בעשרות השנים האחרונות באופן נרחב. קיימים מקורות שונים הדנים באופן יסודי במכלול הסוגיות הקשורות לדינמיקה של פיצוצים אשר יכולים לשמש מקורות מידע בנושאים אלה [17], [18], [19]. קיימים גם מקורות מידע נוספים, כגון המדריך האמריקאי [16], או תוכנות מחשב שונות המאפשרות חישובים בתנאים פשוטים יחסית (לדוגמא ConWep).

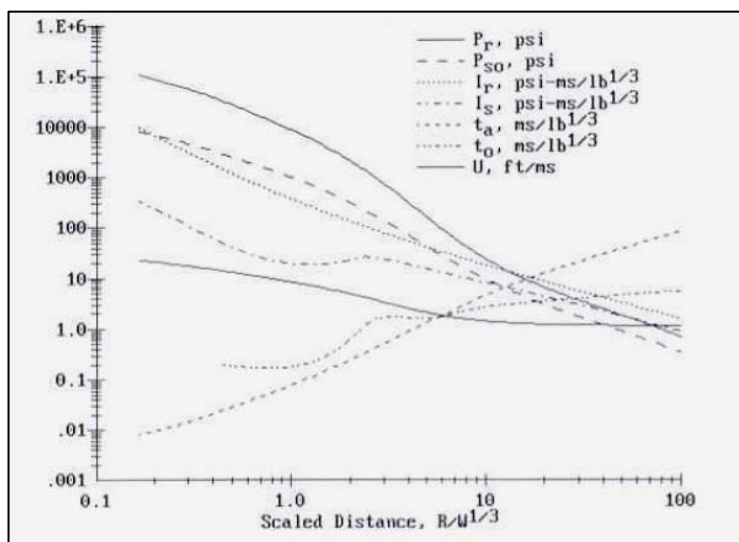
לאור המורכבות של תופעת התפשטות גלי ההדף, בעיקר כאשר מדובר בפיצוץ קרוב או כאשר התנאים הגיאומטריים של המכשולים השונים אינם פשוטים, נדרשים לעתים כלי חישוב מתקדמים, כאשר כלי החישוב הפשוטים המוצגים במקורות הנ"ל אינם מאפשרים מתן מענה לתנאים מורכבים כאלה. בתנאים כאלה ניתן להשתמש בתוכנות מחשב הידרודינמיות המיועדות לניתוח תופעות כאלה בתנאים מורכבים.

לחצי ההדף המירביים הנגרמים ע"י פיצוץ רש"קים או אמצעי חבלה מהסוגים המוזכרים בסעיפים 2.2 ו- 2.3 לעיל צפויים להיות בשיעורים של אטמוספרות רבות ומשך פעולתם נמדד במילישניות. באיור 2.5 מוצגת לדוגמא, באופן איכותי, צורת ההשתנות אופיינית של לחץ הדף אוויר באוויר חופשי - P_{so} בתלות בזמן ושל לחץ ההדף המוחזר מפני מטרה קשיחה - P_r . השטח שמתחת לחלק החיובי של עקום השתנות לחץ הדף מוחזר בתלות בזמן, מגדיר את האימפולס המוחזר הכולל - I_r ליחידת שטח, הנמסר למבנה בנקודה הנדונה, כתוצאה מפיצוץ כמות חומר נפץ נתונה במרחק מוגדר מאותה נקודה. בדומה לכך, השטח שמתחת לחלק החיובי של עקום השתנות לחץ הדף האוויר בשדה חופשי בתלות בזמן, מגדיר את האימפולס הכולל בשדה חופשי - I_s ליחידת שטח בנקודה הנדונה. מעיון באיור זה ניתן להבין שזמן קצר t_a לאחר ייזום הפיצוץ מגיעה חזית גל ההדף אל הנקודה הנדונה. באותו רגע חל גידול חד בלחץ הדף האוויר בשדה חופשי ובלחץ המוחזר המתאפיינים בגידול קצר משך של הלחצים לערכם המרבי ובדעיכתם המהירה מאוד תוך זמן t_0 עד למצב בו הלחץ יורד לרמת הלחץ האטמוספרי ששרר במקום קודם להתרחשות הפיצוץ. בפיצוץ בשדה חופשי מתרחשת תנועת אוויר הגורמת בהמשך לירידת ברמת הלחץ מתחת לערכו האטמוספרי ומגדירה בכך מצב של תת לחץ (יניקה) בשיעור נמוך בהרבה מערך העל לחץ המרבי, למשך זמן ארוך יותר במידה ניכרת ממשך פעולת העל לחץ. בדרך כלל החלק הדומיננטי של לחצי ההדף המשפיע באופן משמעותי על תגובת מבנים הנדסיים הינו החלק החיובי (העל לחץ). לכן נהוג לעתים קרובות להתייחס בניתוחים אנליטיים של תגובת מבנים הנדסיים ללחצי הדף רק לחלק זה של עומס ההדף. יחד עם זאת מן הראוי לציין כבר בשלב זה שהנחה זו אינה נכונה בכל מקרה.

באיור 2.6 להלן מוצגות לצורך התרשמות דיאגרמות שבאמצעותן מתוארת השתנות פרמטרים ישימים של גלי הדף המוזכרים לעיל: $t_0, t_a, I_r, I_s, P_r, P_{so}, U$, הנגרמים על ידי פיצוץ מטען TNT חצי כדורי המתפוצץ על פני מישור אופקי, בתלות במרחק המקום ממוקד הפיצוץ (ע"פ [16]). יש לשים לב לעובדה שהנתונים המוצגים באיור זה אינם ביחידות SI, אלא ביחידות אימפריאליות, לרבות המרחק המקום שהוא ביחידות $\text{ft/lb}^{1/3}$. במקורות מידע שונים (למשל [14], [16]) ניתן למצוא גם דיאגרמות דומות המתאימות לפיצוץ מטען כדורי.

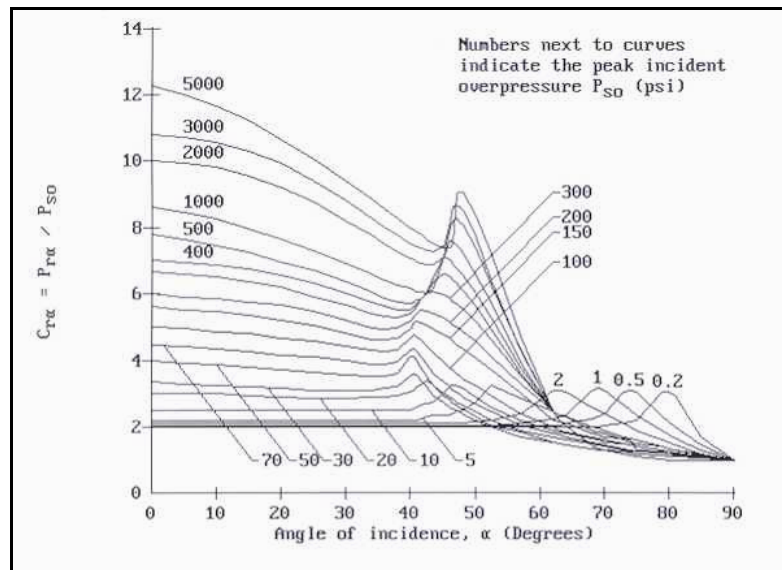


איור 2.5: השתנות אופיינית של לחץ הדף בשדה חופשי ושל לחץ מוחזר בתלות בזמן



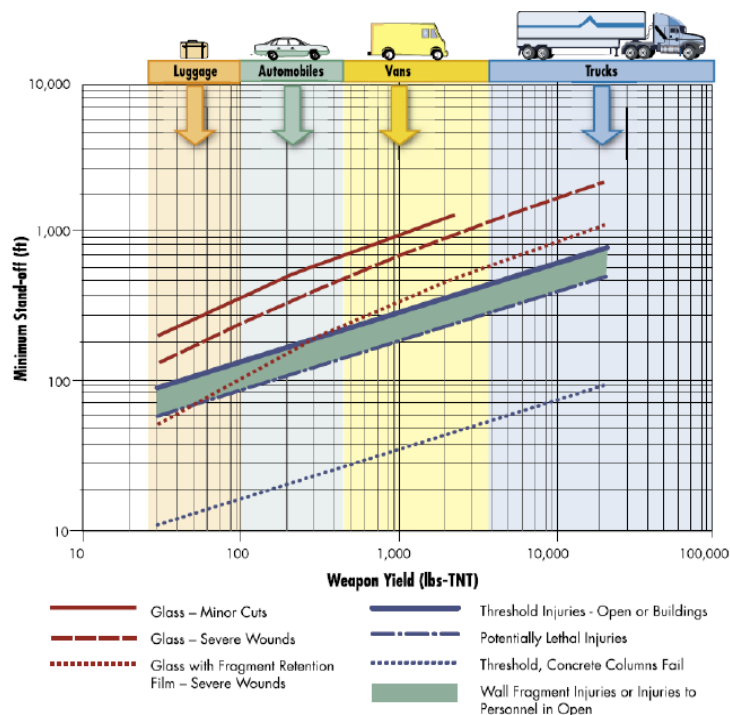
איור 2.6: פרמטרים של גל הדף אוויר הנגרם ע"י פיצוץ מטעני TNT חצי כדוריים
על פני מישור אופקי בתלות במרחק המקונם ממוקד הפיצוץ – על פי [16]

עוצמת לחץ ההדף המוחזר P_r והאימפולס המוחזר מפני המבנה I_r תלויים, כאמור, גם בגיאומטריה היחסית של המבנה ביחס למוקד הפיצוץ. באיור 2.7 להלן מוצגות לדוגמא דיאגרמות המתארות את השתנות לחצי הדף אוויר המוחזרים מפני גוף/מבנה קשיח P_{ra} , התלויים בזווית הפגיעה α של גלי הדף אוויר הפוגעים במטרה ובלחץ ההדף באוויר חופשי (ע"פ [16]). זווית פגיעה $\alpha = 0^\circ$ מייצגת גל לחץ הפוגע בניצב לפני המטרה/המבנה ואילו זווית פגיעה $\alpha = 90^\circ$ מייצגת גל לחץ הנע במקביל לפני המטרה/המבנה. מתוך עיון באיור 2.7 ניתן ללמוד שלחצי הדף אוויר מוחזרים צפויים להיות גבוהים באופן משמעותי מלחצי הדף באוויר חופשי, בעיקר במקרה של פיצוץ קרוב (מרחק מקונם קטן).



איור 2.7: השתנות לחצי ההדף המוחזרים מפני מטרה קשיחה בתלות בזווית הפגיעה במטרה וברמת לחץ ההדף באוויר חופשי – על פי [16]

ככל שלחצי ההדף והאימפולסים המוחזרים הינם גבוהים יותר, הנזק הצפוי להיגרם לרכיבים מבניים ולרכיבים לא מבניים של בניינים ושל מבנים הנדסיים אחרים הינו חמור יותר. כך הדבר גם ביחס לסכנות לפגיעה באנשים. בדיאגרמות שבאיור 2.8 מוצגים נתונים לגבי נזקים שונים בתלות בכמות חומר הנפץ המתפוצץ ומרחק מוקד הפיצוץ ממבנה/רכיב מבני/אדם, תוך ייחוס כמויות חומר הנפץ לסוגים שונים של איומי טרור (מטעני חבלה, מכוניות תופת), על פי המפורט בסעיף 2.3 לעיל.



איור 2.8: קשר בין כמות חומר הנפץ המתפוצץ ומרחק ממוקד הפיצוץ

לנזקים/פגיעות חזויים – על פי [21]

דיאגרמות כאלה, או דומות להן, ניתן למצוא במקורות מידע זרים שונים, למשל ב- [21] או במסמך FEMA 426 [22], המתייחסים לאמצעים לצמצום סכנות פגיעה טרוריסטית בבניינים. מן הראוי להדגיש שדיאגרמות מהסוג הנדון יכולות לשמש להערכות ראשוניות בלבד של הנזקים החזויים לאנשים ולבניינים כתוצאה של פיצוצים, אך אין להסיק מהן מסקנות סופיות כלשהן. לאור זאת, יש להתייחס בזהירות רבה לנתונים המוצגים בהן, כאשר מדובר על הערכת נזקים צפויים בבניינים בלתי מוגנים רגילים כתוצאה מהתרחשות פיצוץ בקרבתם.

התיאורים שלעיל מתייחסים להדף אוויר כתוצאה של פיצוץ באוויר חופשי במרחק מוגדר ממבנה. בנוסף למצב כזה של פיצוץ ביחס למבנה הנבדק יתכנו בתנאים מסוימים גם מצבים שבהם הפיצוץ מתרחש בתוך המבנה (למשל במקרה של פגיעה ישירה של רש"ק עם מרעום השהייה במעטפת הבניין וחדירתו לתוך הבניין בטרם התרחשות הפיצוץ, או במקרה של פיצוץ מכונית תופת החונה בקומת קרקע פתוחה של בניין או בחניון תת קרקעי של בניין). פיצוץ כמות חומר נפץ נתונה בתוך בניין או בקומת קרקע פתוחה של בניין (קומת עמודים), עלול לגרום ללחצי הדף ואימפולסים מוחזרים חמורים יותר במידה משמעותית, בהשוואה לפיצוץ של אותה כמות חומר נפץ באוויר חופשי מחוץ לבניין. הסיבות העיקריות לכך הינן:

- כליאת הפיצוץ במידה מסוימת ע"י הרכיבים המבניים השונים של הבניין (קירות, רצפות, תקרות);
- החזרות גלי ההדף ממישורים חומריים שונים (קירות, רצפות, תקרות);

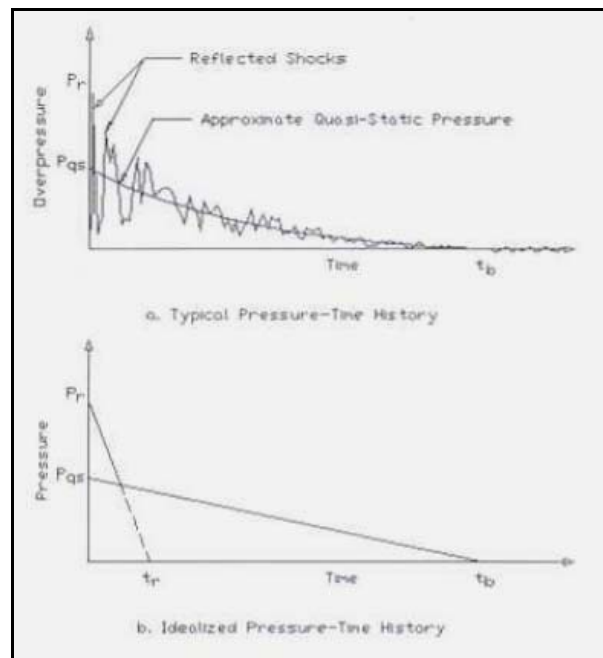
כמו כן, עוצמת לחצי ההדף והאימפולסים הנגרמים ע"י פיצוץ בחלל פנימי של בניין או בקומת עמודים פתוחה של בניין, הצפויים לפעול על רכיבים מבניים ולא מבניים שונים של הבניין, תלויה גם בנתוני הגיאומטריים שלהן:

- נפח החלל שבו מתרחש הפיצוץ;
- מיקום מוקד הפיצוץ בחלל הבניין;
- קיום או העדר של פתחים (פתחי חלונות, דלתות וכו');;
- היחס בין נפח החלל בו מתרחש הפיצוץ לשטח הפתחים במעטפתו;

באיור 2.9 מוצגת לדוגמא צורת השתנות איכותית של הלחץ המוחזר מפני מישורים של רכיבים מבניים, כתוצאה מפיצוץ בתוך חלל סגור חלקית (למשל פיצוץ של רש"ק כלשהו החודר, בטרם התפוצצותו, דרך מעטפת של בניין לחלל פנימי של הבניין, או פיצוץ של מטען חבלה או מכונית תופת בקומת כניסה פתוחה באופן חלקי או בחניון תת קרקעי של בניין). מתוך השוואה איכותית של איור 2.9 לאיור 2.5 ניתן להסיק שבנוסף לחלק האימפולסיבי של לחצי ההדף המוחזרים – P_r , פיצוצים כלואים באופן חלקי או מלא מתאפיינים גם בהחזרות של לחצים ממישורים מבניים שונים, כמתואר לעיל, שעוצמתם אומנם פחותה באופן משמעותי מהלחץ המוחזר

המרבי, אך משך פעולתם הינו ארוך במידה ניכרת ממשך פעולת לחצי ההדף המוחזרים הנגרמים ע"י פיצוץ באוויר חופשי. כתוצאה מכך האימפולס המוחזר הכולל I_r שנמסר למבנה במצב כזה הינו גדול יותר, לעתים במידה ניכרת, מזה הנגרם ע"י פיצוץ באוויר חופשי.

מן הראוי לציין שקיים קושי להעריך באופן כמותי את ההגברות השונות של לחצי ההדף המתוארות לעיל, ברמת אמינות מספקת ולא שמרנית יתר על המידה, באמצעות כלים אנליטיים פשוטים, כגון תוכנת ConWep. ניתן להעריך השפעות אלה ברמת אמינות גבוהה למדי, באמצעות אנליזות מורכבות בעזרת תכנות מחשב מתקדמות. יש לציין כי אנליזות כאלה הן עתירות משאבים ולא בכל מקרה ניתן ליישמן. מכלול נושאים אלה מהווה את אחת הסוגיות החשובות שיש להתייחס אליהן בניתוחים של עמידות בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כגון בנייני מגורים וכו'.



איור 2.9: השתנות אופיינית של לחצי הדף מוחזרים מפני מישורים של רכיבים

מבניים במקרה של פיצוץ כלוא באופן חלקי או מלא – על פי [16]

2.4.3 רסס

פיצוץ באוויר של רש"קים ושל אמצעי חבלה מהסוגים המוזכרים בסעיפים 2.2 ו- 2.3 לעיל גורם, בנוסף להיווצרות לחצי הדף, גם לריסוק המעטפת המתכתית של הרש"ק לרסיסים ולפיזור הרסיסים למרחקים גדולים ממוקד הפיצוץ. הפיצוץ מרסק את המעטפת המתכתית העוטפת את חומר הנפץ והוא מקנה לרסיסים הנוצרים אנרגיה קינטית משמעותית, הגורמת לכך שהם מועפים במהירויות גבוהות מאוד, היכולות להגיע למאות ואף לאלפי מטרים בשנייה, ולהגיע

למרחקים גדולים למדי, עד למאות מטרים ממוקד הפיצוץ (בתלות במסת הרסיסים, בצורתם ובמהירותם התחילית). לאור מאפיינים אלה של הרסיסים הם בעלי יכולת חדירה משמעותית, בעיקר למטרות רכות, כדוגמת גוף אדם וגם למטרות קשות שעוביין מוגבל, כגון קירות מסך, חלונות ודלתות רגילים ואף קירות בני או קירות בטון מזוין בעלי עובי מוגבל. לכן הם מהווים גם סיכון משמעותי מאוד לחיי אנשים. הסיכון של היפגעות אנשים על ידי רסיסים הינו משמעותי במיוחד כאשר אנשים שוהים מחוץ לבניינים, אם כי גם כאשר הם שוהים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים הם עלולים להיפגע מאותם רסיסים שיש להם אנרגיה קינטית מספקת לחדור את מעטפת הבניין הבלתי מוגן. לאור מאפיינים אלה של הרסיסים, במקרים בהם מטרות התוקף מתמקדות בגרימת מקסימום אפשרי של פגיעה באנשים, ניסיון העבר מלמד כי גורמים עוינים שונים נוהגים להוסיף לרש"קים או לאמצעי החבלה השונים חלקים מתכתיים קטנים, למשל כדוריות פלדה, המעורבים עם חומר הנפץ, על מנת להגדיל את כמות הרסיסים הנוצרים בזמן הפיצוץ ולהגביר על ידי כך את אפקט ההרג שלו. חלק מרקטות וטילים המשוגרים בתקופות שונות על ידי ארגוני טרור שונים (חיזבאללה, חמס וכו') מעבר לגבולות המדינה לכוון ישובים אזרחיים שונים כוללים אף הן כדוריות מתכת כאלה. כך נוהגים גם לעתים קרובות ארגוני הטרור השונים, כאשר הם מפעילים מחבלים מתאבדים המפוצצים את עצמם במקומות ריכוז של אנשים רבים, או כאשר הם מפעילים מכוניות תופת.

בניגוד לסיכון הרב מאוד שמהווים רסיסים לאנשים, פגיעתם במטרות קשות, כגון ברכיבי בטון מזוין של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים, גורמת בדרך כלל רק לנזקים מקומיים קלים יחסית ולחדירה רדודה יחסית של הרסיסים ברכיבים אלה. נזקי חדירה מקומית רדודה של רסיסים ברכיבי הבטון המזוין של בניין אינם בדרך כלל משמעותיים או הרסניים עבור הבניין/הרכיב המבני הנפגע, פרט למקרים קיצוניים בהם מתרחשת פגיעה של רסיסים רבים באזור רגיש של רכיב מבני מבטון מזוין/בטון דרוך, העלולה לגרום לחיתוך מוטות הזיון או של גדילי דריכה ו/או להרס מקומי משמעותי של הבטון ברכיבים המבניים הנפגעים. הדבר יכול להיות מסוכן, לדוגמא במקרה של פגיעה כזו בעמודי בטון מזוין בעלי מידות חתך מוגבלות, כפי שקיים במקרים רבים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים בעלי מספר קומות מוגבל, זאת כתוצאה של פגיעה משמעותית ביכולת העמודים הנפגעים לשאת את עומסי הכבדה הפועלים עליהם דרך קבע. יחד עם זאת, מאחר שאפקט הרסס, והשפעתו על רכיבים מבנים מבטון מזוין של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, בהשוואה לאפקטים אחרים של פיצוץ, נראית שולית לכאורה, נהוג לעתים קרובות להזניח השפעה זאת בניתוחים הנדסיים וחישוביים של תגובת מבנים ו/או רכיבים מבניים מבטון מזוין לאפקטים של פיצוצים. לאור האבחנות שלעיל, המצביעות על מצבים בהם עלול הרסס להשפיע באופן חמור על תפקוד המערכת המבנית, נראה כי יש מקום לבחון באופן ביקורתי הנחה זו, למשל במקרה שקיים סיכון שהרסיסים יפגעו בעמודי בטון מזוין בדלים בעלי מידות חתך מוגבלות, כמפורט לעיל, או בקורות בטון דרוכות, באזורים הכוללים את גדילי הדריכה, זאת מכיוון שפגיעה כזו עלולה לגרום לחיתוךם של הגדילים ולכשל הקורות הנפגעות. הדבר עלול להתרחש למשל במקרה של פיצוץ מכונית תופת בחניון תת קרקעי שתקריותיו כוללים קורות בטון דרוכות. מן הראוי להדגיש שבכל אותם מקרים בהם יש צורך או הצדקה לבחינה מעמיקה של השפעות רסס על רכיבים מבניים שונים של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים,

כמפורט לעיל, יש להתחשב בפעולה משולבת של עומסי הדף ושל הרסס על הרכיבים המבניים הנבדקים.

בניגוד לפיצוץ באוויר שם מועפים הרסיסים למרחק ניכר באנרגיה גבוהה, במקרה של פיצוץ רש"קים מהסוגים הנדונים לאחר חדירתם בקרקע, הרסיסים הנוצרים במהלך הפיצוץ נבלמים בקרקע במרחק קצר מאוד ממוקד הפיצוץ. לכן במקרים כאלה אין הרסיסים מהווים כל סיכון ממשי לבניינים אזוריים בלתי מוגנים רגילים ואף לא לאנשים.

2.4.4 הלם קרקע

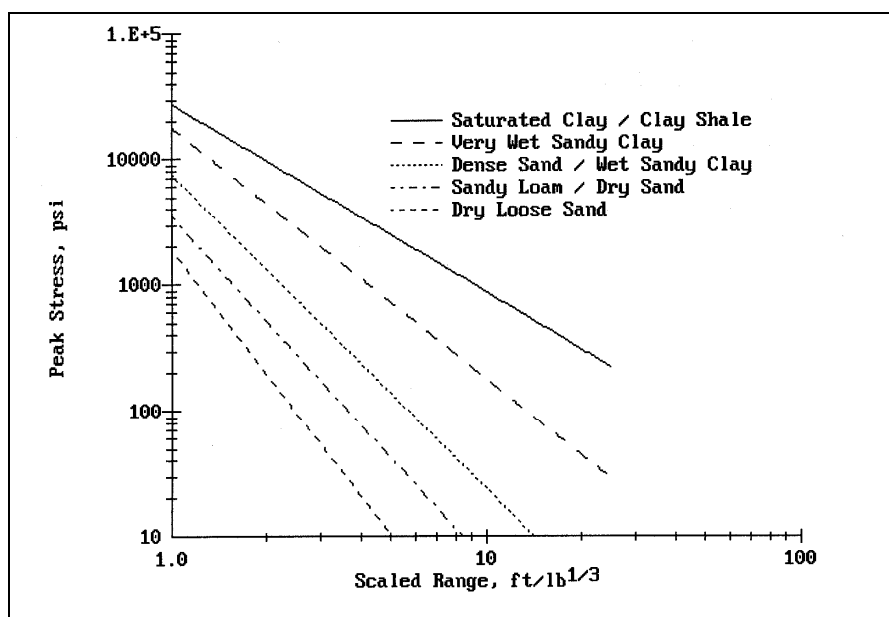
הלם קרקע נגרם כתוצאה מפיצוץ חומר נפץ על פני הקרקע, בסמוך אליו, או בתוך התווך התת קרקעי. הלם קרקע עלול להשפיע בעיקר על מבנים תת קרקעיים, או על חלקים של מבנים הנדסיים שונים הנמצאים במגע עם קרקע, לרבות יסודות ו/או קירות מרתף של בניינים אזוריים בלתי מוגנים רגילים. זעזועי הקרקע הנגרמים ע"י פיצוץ בתווך קרקעי בקרבת היסודות של מבנים עיליים, עלולים לגרום לנזקים שונים לרכיבי מערכות הביסוס שלהם ולתנודות דינמיות של המבנה העילי.

בדומה להדף אוויר, גם הלם קרקע הנגרם ע"י פיצוץ חומר נפץ מתאפיין על ידי:

- עמיסה דינמית אימפולסיבית בעלת עוצמה גבוהה ומשך פעולה קצר יחסית;
 - פירוס עומסים בלתי אחיד, התלוי בזמן ובמיקום על פני המבנה החשוף להלם קרקע;
- העוצמה של הלחץ המרבי של הלם קרקע בנקודה מוגדרת כלשהי במרחב התת קרקעי, או על פני חלק תת קרקעי מסוים של מבנה הנדסי, תלויה בגורמים שונים כדלהלן:
- סוג וכמות חומר הנפץ המתפוצץ - ככל שכמות חומר הנפץ המתפוצץ גדולה יותר לחצי הלם הקרקע הנגרמים ע"י הפיצוץ הינם משמעותיים יותר (עבור תווך קרקע נתון);
 - מרחק הנקודה הנבדקת ממוקד הפיצוץ – ככל שהמרחק בין נקודה הנבדקת למוקד הפיצוץ קטן יותר עוצמת הלחץ המרבי של הלם הקרקע הנובע מפיצוץ כמות נתונה של חומר נפץ הינה גדולה יותר (עבור תווך קרקעי נתון);
 - מיקום מוקד הפיצוץ ביחס לתווך הקרקע (פיצוץ על פני הקרקע, פיצוץ טמון באופן חלקי, פיצוץ טמון באופן מלא) – ככל שמוקד הפיצוץ עמוק יותר עוצמת הלם הקרקע הנובע מפיצוץ כמות נתונה של חומר נפץ הינה גדולה יותר (עבור תווך קרקע נתון);
 - התכונות החומריות והמיכניות של תווך הקרקע (סוג הקרקע, צפיפותו, תכולת חללי אויר ותכולת הרטיבות בקרקע, המהירות הסייסמית בקרקע, מידת האטנואציה-דעיכה של גלי ההלם בקרקע וכו').
 - זווית פגיעת גלי ההלם במישור של מכשול (מבנה טמון) הנמצא במגע עם הקרקע, התלויה במיקום היחסי של מוקד הפיצוץ ביחס לנקודה הנדונה - כאשר הקו הדמיוני המקשר בין מוקד הפיצוץ לנקודה מוגדרת נתונה על פני החלק התת קרקעי של המבנה הינו ניצב לפני

המבנה החשופים להלם קרקע, לחצי הלם הקרקע בנקודה זו יהיו מרביים, בהשוואה לנקודות אחרות על פני החלקים התת קרקעיים של המבנה הנדון;

הלחץ המירבי והאימפולס של הלם קרקע הנגרמים ע"י פיצוץ רש"קים או אמצעי חבלה מהסוגים המוזכרים בסעיפים 2.2 ו- 2.3 לעיל במרחק נתון ממבנה תת קרקעי עלולים להיות בשיעורים גבוהים יותר מלחצי הדף אוויר הנגרמים ע"י פיצוץ באוויר של אותם רש"קים במרחקים זהים ממוקד הפיצוץ. העוצמה המרבית של לחצי הלם קרקע עלולה להיות בשיעורים של אטמוספרות רבות. משך פעולתם, למרות שהוא קצר מאוד, הינו ארוך יחסית בהשוואה למשך הפעולה של הדף אוויר, ומשך עליית שיא הלחץ איטי יותר. צורת הדעיכה של לחצי הלם קרקע מערך השיא שלהם הינה בעלת אופי אקספוננציאלי בעיקרון, אך מורכב יותר בהשוואה לפיצוץ באוויר. באיור 2.10 להלן מוצגות לדוגמא דיאגרמות לצורך הערכת לחצי הלם קרקע בשדה חופשי P_{s0} , הנגרמים ע"י פיצוץ טמון במלואו, בתלות במרחק המקונם של מוקד הפיצוץ מהנקודה הנבדקת התווך הקרקע, הנקוב כאן ביחידות אימפריאליות, בדומה לאיור 2.6 לעיל, וסוג תווך הקרקע בו מתרחש הפיצוץ. בדומה ללחצי הדף אוויר, גם לחצי הלם קרקע הפוגעים במישורים קשיחים של מבנים, מוחזרים מהם בצורה מוגברת. נתונים מפורטים ביחס לאופן הקביעה של לחצי הלם קרקע ניתן למצוא במקורות מידע שונים, למשל [14], [16], [17] ו- [20].



איור 2.10: השתנות לחץ בשדה חופשי של הלם קרקע הנגרם ע"י פיצוץ טמון במלואו, בתלות במרחק המקונם של מוקד הפיצוץ וסוג הקרקע – על פי [16]

הידע הקיים לגבי התפשטות גלי הלם בקרקע הינו קטן ומוגבל יחסית בהשוואה לידע הקיים לגבי פיצוץ באוויר החופשי, ובמקרים רבים הערכת צורת פולס הלחץ הפועל על מכשול טמון בקרקע אינה ניתנת להיעשות באופן אמין די הצורך באמצעות כלים אנליטיים פשוטים. אומנם כאשר מדובר על בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים, ניתן להעריך את

ההשפעה החזויה של הלם קרקע עליהם גם בכלי הערכה פשוטים יחסית, כדוגמת תוכנת ConWep. יחד עם זאת, במקרים בהם קיימת חשיבות רבה להערכה אמינה ומדויקת ככל הניתן של השפעות הלם קרקע, כמו במקרים של בחינת השפעתם על מבנים תת קרקעיים חשובים, יש מקום להיעזר בכלי חישוב מתקדמים ומורכבים יותר שהוזכרו לעיל.

מן הראוי לציין שפיצוץ כמות משמעותית של חומר נפץ על פני או בתוך תווך קרקע גורם לא רק להלם קרקע, אלא גם לזעזועים ולתזוזות קרקע, ותנועת הקרקע משפיעה על תנועת המבנה הטמון ועל רכיבים שונים המצויים בו. כמו כן, פיצוץ בתווך קרקע גורם למיכתוש סביב מוקד הפיצוץ, כמתואר בסעיף 2.4.5 להלן. כל אלה עלולים להשפיע לרעה על חלקים ורכיבים תת קרקעיים של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כגון קירות מרתף ו/או יסודות של בניינים.

בחומרים מקובלים אחרים (בטון למשל) יהיו הרבה פחות מצבים בהם יתרחש פיצוץ בעומק שכבה העשויה מהחומר הנדון ובמרבית המקרים יש לדון בפיצוץ רדוד או בפיצוץ בפני השטח. גם צורת הנזק וההרס תלויה בחומר ממנו עשוי התווך; במקרה של בטון צורת ההרס תתבטא בסדיקה, בגזירה ובעוצמות גבוהות של לחצים גם בכתישה ומעיכה של החומר.

2.4.5 מיכתוש

כאשר מתרחש פיצוץ של חומר נפץ בקרבת או בתוך תווך חומרי (קרקע, סלע או בטון וכו'), נוצר מכתש סביב מוקד הפיצוץ, עקב הרס החומר הסמוך למוקד הפיצוץ והעפתו לאוויר במהלך הפיצוץ. באיור 2.11 מוצגים נתונים גיאומטריים בסיסיים של מכתשים הנוצרים כתוצאה של פיצוץ על פני קרקע, או בעומק מוגבל בתווך קרקעי (חתך אנכי דרך חצי מכתש סימטרי- עד ציר סימטריה אנכי).

כפי שצוין בסעיף 2.4.4 לעיל, יצירת מכתש בתווך קרקע כתוצאה מפיצוץ כמות נתונה של חומר נפץ על פני או בתוך הקרקע עלולה לגרום לנזקים חמורים ואף לכשל/הרס של חלקי מבנים הנדסיים הבאים במגע עם התווך הקרקעי או הנמצאים בתוכו, כגון יסודות של בניינים או קירות תת קרקעיים של מרתפי בניינים. סכנה זו מוחשית במיוחד אם הרכיבים המבניים הנדונים ממוקמים בקרבת מוקד הפיצוץ, כך שהם צפויים להימצא בתחומי המכתש הנוצר כתוצאה מהפיצוץ.

גודל של מכתש (קוטר, עומק, נפח) הנוצר ע"י פיצוץ כמות נתונה של חומר נפץ בסמוך או בתוך תווך חומרי תלוי בגורמים שלהלן:

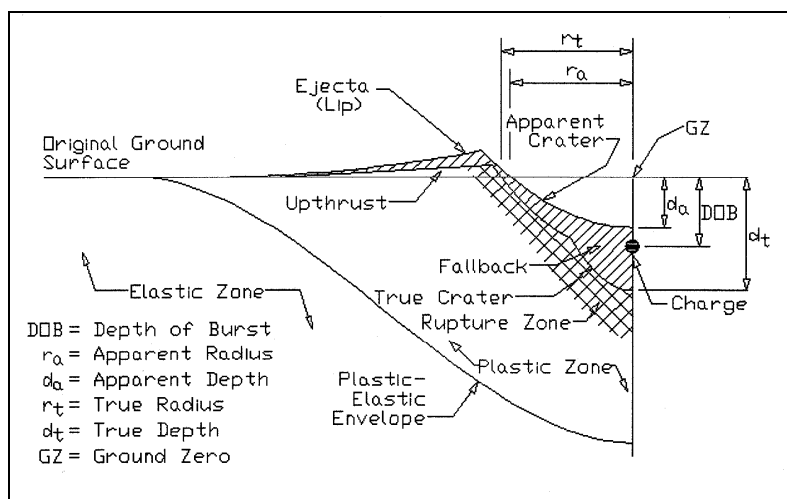
- סוג התווך החומרי ותכונותיו;

גודל מכתשים הנוצרים בקרקעות כתוצאה של פיצוץ תלוי בסוג הקרקע, צפיפותו, תכולת אוויר/חללים ותכולת הרטיבות בקרקע. כך למשל מכתש הנוצר בקרקע חרסיתי עקב פיצוץ של כמות חומר נפץ נתונה במיקום מוגדר ביחס לתווך הקרקעי הינו בעל מימדים גדולים

יותר (קוטר, עומק, נפח) מאשר מכתש הנוצר בקרקע חולי, עקב פיצוץ בעל אותם מאפיינים (סוג וכמות חומר הנפץ, מיקום יחסי של מוקד הפיצוץ). בדומה, גודל המכתש הנוצר בקרקע חולית בעלת תכולת רטיבות גבוהה הינו גדול יותר מאשר זה הנוצר בקרקע חולית יבשה.

גודל המכתש הנוצר בתווך סלעי תלוי בחוזק הלחיצה של סלע, מידת רציפות/סידוק וכמות החללים בו. ככל שחוזק הלחיצה של הסלע גבוה יותר והוא רציף יותר/פחות סדוק, המכתש הנוצר עקב פיצוץ כמות נתונה של חומר נפץ יהיה קטן יותר.

גודל המכתש הנוצר ברכיב מבטון תלוי בחוזק הלחיצה של הבטון, בעוביו ובמידה מוגבלת גם בכמות הזיון שבו. ככל שחוזק הבטון גבוה יותר, בתחומי החוזק המקובלים, גודל המכתש הנוצר עקב פיצוץ כמות נתונה של חומר נפץ בצמוד או בקרבה יתרה לרכיב הינו קטן יותר.



איור 2.11: נתונים גיאומטריים בסיסיים של מכתשים הנוצרים ע"י פיצוץ חומר נפץ

בטון חומרי-קרקע – על פי [16]

• עובי התווך או הרכיב

ברכיבי בטון בעלי עובי מוגבל יחסית, כאשר העומק התיאורטי של המכתש, המחושב בהנחה של תווך בטון חצי אין סופי, הינו כ- 1/3 מעובי הרכיב, צפוי המכתש הנוצר בפני רכיב הבטון להתחבר עם מכתש אחורי הנוצר באותו רכיב בטון כתוצאה מהפיצוץ, עקב גלי מתיחה מוחזרים בעוצמה גבוהה מהשפה האחורית החופשית של הרכיב. בתהליך זה נוצר גם ניתוק חלקי בטון מהשפה האחורית של הרכיב (תופעת השיחון) [16]. הדבר עלול לגרום לפריצת רכיבי בטון בעלי עובי מוגבל, כמתואר באיור 2.12 להלן. הדבר צפוי להתרחש בעיקר במקרים של פיצוץ מגע של מטען המוצמד לרכיב בטון מזויין בעל עובי מוגבל יחסית, או במקרים של פיצוץ קרוב של מטען חומר נפץ גדול. מן הראוי לציין שבמקרים של פיצוץ כמות חומר נפץ גדולה במרחק מקונם קטן מרכיב מבני המוטרך בכפיפה ובגזירה, כגון קירות או

תקרות של בניין, יתכן שילוב של הרס הרכיב הנפגע כתוצאה של פריצתו כמתואר לעיל, בשילוב עם כשל כפיפה ו/או גזירה של הרכיב הנדון, עקב פעולת עומסי הדף אוויר או הלם קרקע בעוצמה גבוהה מאוד עליו. במקרים בהם הפיצוץ אינו של מטען חומר נפץ ניח, אלא של רש"ק הפוגע במטרה במהירות מסוימת, כגון במקרה של פגיע ישירה של פגזים, פצצות, רקטות, או טילים מסוגים ישימים שונים, כמפורט בסעיף 2.2 לעיל בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, הסכנה לפריצת הרכיב הנפגע גדולה עוד יותר, עקב תופעות הנגיפה והחדירה של הרש"ק המפורטות בסעיפים 2.4.6 ו- 2.4.7 להלן.

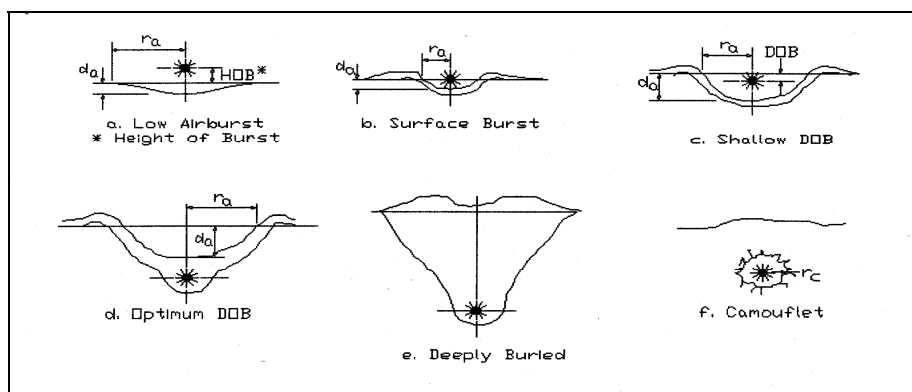
- כמות חומר הנפץ המתפוצץ ובמידה מוגבלת יותר גם צורת המטען (מטען כדורי, מטען צילינדרי וכו');;
- מיקום מוקד הפיצוץ ביחס לפני התווך החומרי, למשל פיצוץ באוויר בקרבת פני התווך החומרי, פיצוץ מגע בפני התווך החומרי, פיצוץ טמון בעומק זה או אחר בתוך התווך החומרי (פיצוץ בעומק רדוד, פיצוץ בעומק רב, פיצוץ כלוא לחלוטין), כמתואר באיור 2.13 להלן.



איור 2.12: פריצת קיר בטון מזוין בעל עובי מוגבל כתוצאה של פיצוץ מטען חומר נפץ גדול בקרבתו – מרחק מקונום של מוקד הפיצוץ – $z \approx 1.00 \text{ m/kg}^{1/3}$

בדומה לאמור לגבי ניתוח האפקטים האחרים של פיצוצים, נהוג כיום להיעזר בתוכנות מחשב שונות לצורך הערכת מימדי המכתשים הצפויים להיווצר בטווח חומרי נתון, כתוצאה מפיצוץ כמות נתונה של חומר נפץ מסוג מוגדר בסמוך, או בתוך התווך החומרי הנדון. חלק

מתוכנות אלה הינן פשוטות יחסית, כמו תוכנת ConWep המוזכרת לעיל, המבוססת על שימוש בביטויים אמפיריים שונים, המותאמים לסוגים שונים של נתוני תווח חומרי, ואילו האחרות הינן תכנות הידרודינמיות, אשר דורשות קיום מידע רב ואמין בקשר לתכנות ישימות שונות של התווח החומרי שבו נוצר המכתש.



איור 2.13: אופי וצורות אופייניות של מכתשים בתווח קרקע בתלות במיקום מוקד הפיצוץ ביחס לתווח החומרי הנבדק

2.4.6 נגיפה

פגזים, רקטות, טילים ופצצות הפוגעים ישירות במבנה הנדסי, לרבות בבניינים אזרחיים רגילים, כדוגמת בבניין מגורים וכו', מעמיסים אותו, בנוסף לעומסי הדף הנגרמים כתוצאה מפיצוץ חומר הנפץ שברש"ק, גם בעמיסה דינמית אימפולסיבית, הנובעת מנגיפה-אימפקט של הרש"ק, המאופיין במסה, בצורה, במבנה המיכני של מעטפת הגוף המתנגש ובמהירות הפגיעה. פגיעת הרש"ק ברכיב מבני כלשהו מקנה אנרגיה קינטית למבנה הנפגע, ובגלל האופי המקומי של הנגיפה עלול להתרחש תהליך מקומי של נזק (מיכתוש) וחדירה של הרש"ק, התלוי במידה רבה בנתוני המעטפת של הרש"ק וביכולתה לעמוד בלחצי המגע הגבוהים עם המטרה הנפגעת. בתהליך זה, הנמשך זמן קצר מאד, נגרם נזק מקומי ניכר למטרה הנפגעת, וייתכן גם עיוות ושבירה של הרש"ק הפוגע. כתוצאה מהקניית האנרגיה למטרה הנפגעת מתפתחת תגובה דינמית של הרכיב הנפגע. מידת החומרה של נגיפה-אימפקט של רש"ק ברכיב מבני נתון תלויה בעיקר בגורמים שלהלן:

- מסת הרש"ק;

המסה של רש"קים נעה בין קילוגרמים ספורים עד עשרות קילוגרמים, כאשר מדובר בפגזי ארטילריה, בפגזי מרגמה או ברקטות לטווח קצר. לעומת זאת, המסה של טילי אוויר קרקע, פצצות אוויר, טילי קרקע-קרקע, טילים בליסטיים וטילי שיוט הינה בדרך כלל של מאות ואף אלפי קילוגרמים. ככל שמסת הרש"ק גדולה יותר אפקט הנגיפה-האימפקט שלו משמעותי יותר.

- מהירות הפגיעה של הרש"ק ;
מהירויות הפגיעה של הרש"קים השונים הינן בכל מקרה גבוהות (בדרך כלל מספר מאות מטרים בשנייה ולעתים אף אלף מטר בשנייה ויותר). ככל שמהירות הפגיעה של הרש"ק גבוהה יותר, אפקט הנגיפה-האימפקט שלו משמעותי יותר.
- נתונים חומריים, גיאומטריים ומבניים של הרכיב המבני הנפגע (סוג וחוזק חומר הבנייה ממנו עשוי הרכיב, עובי הרכיב המבני, מסתו, סכימה המבנית שלו וכו'); ;

מן הראוי לציין שתופעת הנגיפה-האימפקט אינה מצטמצמת לפגיעה ישירה של רש"קים שונים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים שונים, העלולה להתממש במקרים של מימוש איומים מלחמתיים שונים המאוזכרים בסעיף 2.2 לעיל, אלא עלולה להתרחש גם במקרה של פיגוע טרור באמצעות התנגשות מכוונת של רכב כבד הנוסע במהירות גבוהה בקומת הכניסה של בניינים מהסוג הנדון, כמאוזכר בסעיף 2.3 לעיל. בניתוחים של הסיכונים הנובעים מאיומי הטרור העלולים להיות מופעלים על בניינים אזרחיים בלתי מוגנים, במיוחד בניינים בעלי חשיבות ציבורית או בניינים המאכלסים אנשים רבים, הממוקמים בקרבת דרכי תחבורה הפתוחות לציבור המאפשרות נגישות ישירה אליהם, ללא כל ברקה ובמהירות גבוהה. סיכון זה גדל במיוחד במקרים בהם הבניינים הנדונים כוללים קומת עמודים פתוחה עם עמודים בדלים. כמובן שאירוע כזה עלול להתרחש בתנאים מסוימים גם כתאונה אקראית. גם במקרים אלה, חומרת אפקט הנגיפה תלויה במסת הרכב הפוגע ובמהירות פגיעתו, כמובן בשילוב עם המאפיינים החומריים והגיאומטריים של הבניין הנפגע. אם הרכב הפוגע הוא מכונית תופת, אפקט הנגיפה-האימפקט הנוצר כתוצאה מההתנגשות מצטרף לאפקטי ההדף הנוצרים כתוצאה מהתפוצצות מכונית התופת ולהשפעות השריפה הצפויה בעקבות הפיצוץ, כמוזכר בסעיף 2.3 לעיל.

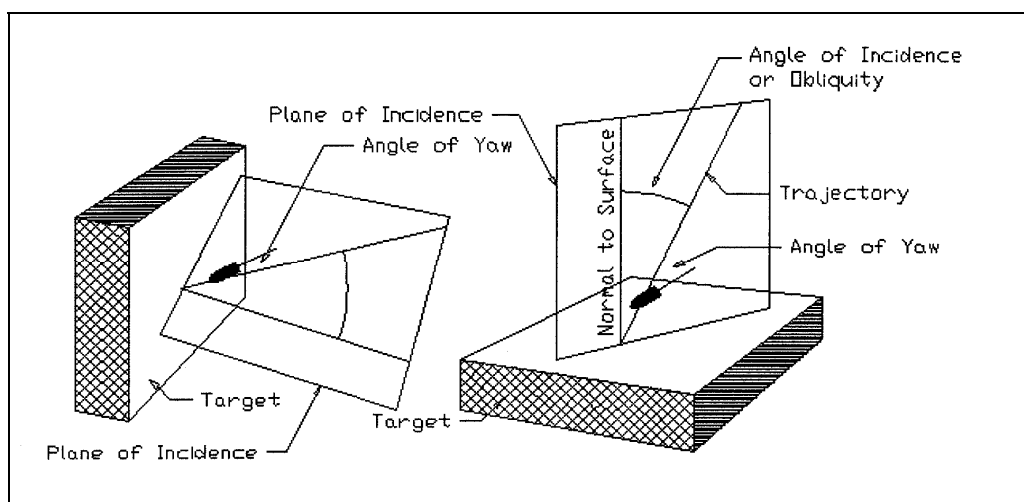
2.4.7 חדירה

פגיעה של פגזים, רקטות, טילים ופצצות הפוגעים ישירות במבנה הנדסי, לרבות בבניינים אזרחיים רגילים, כדוגמת בניין מגורים וכו', עלולה להתבטא, בנוסף לאפקטי המיכתוש והנגיפה-האימפקט המתוארים לעיל, גם בחדירתם לתוך, או דרך הרכיב המבני בו הם פוגעים, זאת בטרם התרחשות פיצוץ חומר הנפץ שהם נושאים. יכולת החדירה של רש"קים שונים למטרות מבניות תלויה בעיקר בגורמים שלהלן :

- מאפייני הרש"ק (משקל, קוטר, אורך, צורת האף, נתוני מעטפת הרש"ק, תכונות החומר ממנו היא עשויה וסוג מרעום ההפעלה) ;
- מאפייני הפגיעה (מהירות הפגיעה, זווית הפגיעה ביחס למישור המטרה והזווית שבין ציר הרש"ק לטרייקטוריית מעופו (Yaw), כמתואר באיור 2.14 ;
- מאפיינים חומריים וגיאומטריים של המטרה ושל הרש"ק הפוגע (חוזק החומרים, עובי מעטפת הרש"ק, עובי הרכיב המבני הנפגע וכו') ;

מן הראוי לחזור ולהדגיש שיכולת החדירה של רש"קים רגילים מהסוגים שעלולים להוות איום על בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים עלולה להיות מוגבלת, בעיקר כאשר הם אינם מצוידים במרעום השהייה מתאים ומעטפתם אינה חזקה די הצורך, על מנת שלא תתעוות או תישבר ברגע הפגיעה במטרה. לאור זאת, במרבית המקרים של פגיעת פגזי ארטילריה רגילים (לא חודרי ביצורים), או של פצצות מרגמה או של רקטות לטווח קצר, במעטפת בטון מזוין של הבניין הנפגע (למשל בגג הבניין או בקירות חיצוניים עשויים מבטון מזוין בעלי עובי מתאים), הפיצוץ של הרש"ק צפוי להתרחש במהלך הפגיעה במטרה ולא לאחר החדירה האפשרית של הרש"ק דרך הרכיב המבני הנפגע של מעטפת הבניין. לא כך הדבר כאשר הפגיעה היא ברכיבי בטון מזוין דקים מדי, או ברכיבים מבניים או לא מבניים שונים של מעטפת הבניין, כדוגמת קירות בני רגילים, קירות מסך קלים, חלונות ודלתות, גגות קלים הכוללים קירוי רעפים וכו'. במקרים אלה תתכן חדירת הרש"קים המוזכרים לעיל אל תוך החללים הפנימיים של הבניין בטרם התפוצצותם. במקרה כזה פיצוץ הרש"ק מתרחש בחלל סגור במלואו או באופן חלקי, עם כל המשתמע בכך בהקשר להגברת ההשפעות ההרסניות של הדף אוויר הנגרם על ידי הפיצוץ הפנימי, כמפורט בסעיף 2.4.2 לעיל. אירועים כאלה של פגיעה ישירה בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים התרחשו במקומות שונים בישראל, במיוחד במהלך מלחמת לבנון השנייה ובמהלך מבצע "עופרת יצוקה".

במקרה של פגיעה ישירה של פצצות אוויר או של טילים שונים, שהם כבדים בהרבה מהרש"קים המוזכרים לעיל ואפקט הנגיפה-האימפקט שלהם הינו משמעותי יותר, יש לבחון את האפשרות שפיצוץ הרש"ק יתרחש לאחר חדירתו המלאה דרך המעטפת החיצונית של הבניין הנפגע, כמוזכר לעיל.



איור 2.14: מאפיינים גיאומטריים של פגיעה ישירה של רש"קים

במטרות מבניות – על פי [16]

2.4.8 שריפה

במקרים שבהם פיצוץ חומר נפץ מתרחש בקרבת חומרים דליקים עלולה בעקבות הפיצוץ להתלקח שריפה. הדבר צפוי להתרחש למשל במקרה של פיצוץ מכונית תופת. שריפה עלולה להתלקח גם במקרה של התנגשות רכב, אקראית או מכוונת, בבניין, או במקרה של פיצוץ פנימי בבניין שיש בו חומרים דליקים (לדוגמא במקרה של פגיעה ישירה של רש"ק כלשהו בבניין בעל מעטפת המאפשרת חדירת הרש"ק לתוכו בטרם התפוצצותו). עוצמת השריפה ומידת חומרתה תלויים כמובן במטען האש, קרי בכמות החומר הדליק הנשרף, במשך השריפה ובמיקומו של מוקד השריפה ביחס למבנה החשוף לאש (בתוך הבניין או מחוצה לו). שריפות עלולות להיות מסוכנות מאוד עבור בניינים, גם אם הם בנויים מחומרים בלתי דליקים כגון בטון מזויין, אם לא מכבים אותן במהירות רבה, מכיוון שהן עלולות לגרום להתחממות רבה למדי, תוך זמן קצר, של רכיביהם המבניים החשופים לאש. הדבר גורם למספר תופעות כדלהלן:

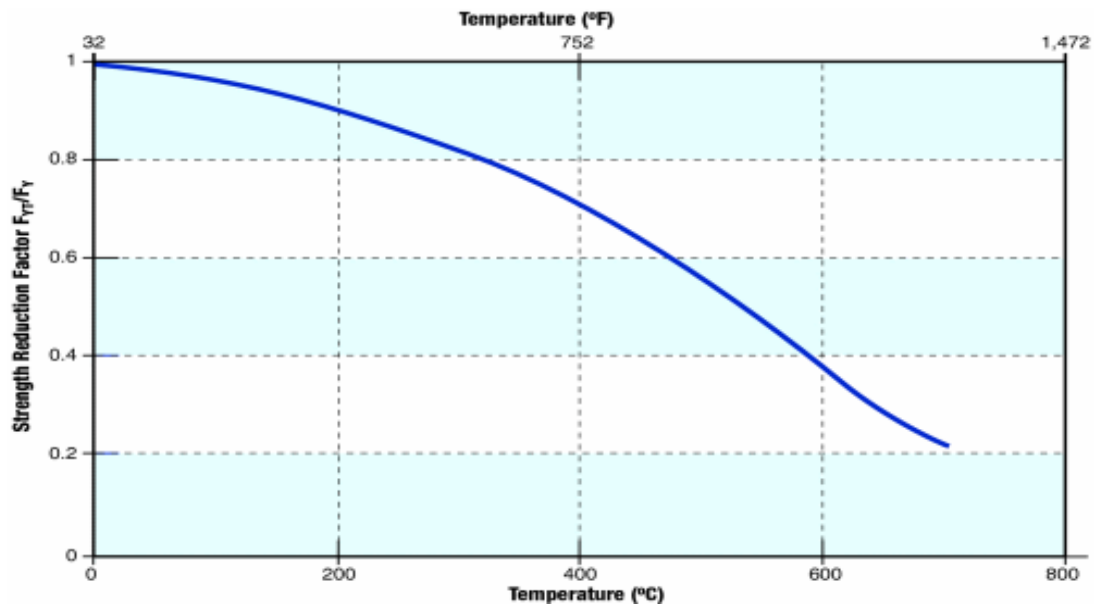
- ירידה משמעותית של חוזק החומרים מהם בנויים הבניינים הנפגעים, הן של פלדות, לרבות פלדות המשמשות לזיון בטון, והן של בטונים. הדבר עלול לגרום לכשל של רכיבים מבניים שונים ואף של הבניין כולו, עקב ירידה משמעותית בתסבולתם (ביכולתם לשאת עומסי כבידה).
- ירידה במודול האלסטיות של החומרים מהם בנויים הבניינים הנפגעים, הן של פלדות, לרבות פלדות המשמשות לזיון בטון, והן של בטונים. הדבר עלול לגרום להגדלה משמעותית של עיווי רכיבים מבניים שונים, כגון קורות, תקרות וכ', זאת במקביל להקטנת תסבולתם, ולהחמרת מצבם כתוצאה מתופעות מסדר שני (אפקט $P-\Delta$).
- שיחון הבטון המכסה את מוטות הזיון ו/או גדילי הדריכה של רכיבי בטון מזויין ו/או בטון דרוך. הדבר עלול להחמיר את תופעות המתוארות לעיל ולזרז את תהליכי הכשל של רכיבי בטון מזויין ו/או בטון דרוך החשופים לאש, במיוחד אלה המוטרחים בלחיצה משמעותית, כדוגמת עמודים של בניינים רבי קומות.

באיורים 2.15 - 2.18 להלן מובאות לדוגמא דיאגרמות אופייניות המציגות את השתנות החוזק ומודול האלסטיות של פלדות ושל בטונים שונים בתלות בטמפרטורה שלהם, בהשוואה לחוזק ומודול האלסטיות שלהם בטמפרטורת סביבה רגילה (20°C).

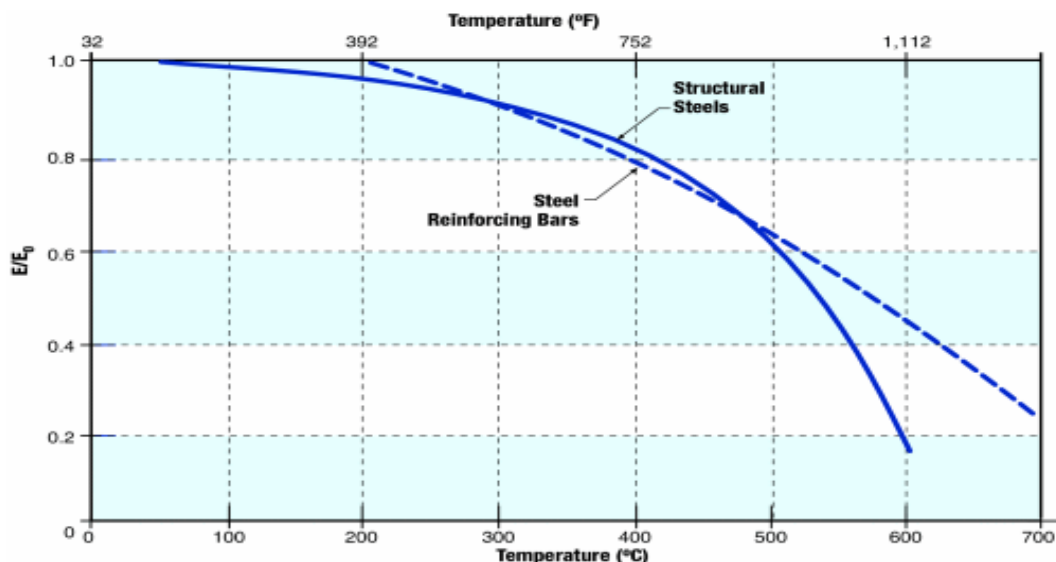
מן הראוי לציין שמרבית המידע הקיים בסוגיות הקשורות לעמידות אש של מבנים מתייחס לעמידות אש של בניינים החשופים לשריפות רגילות העלולות להתלקח בהם, כאשר מטען האש הינו למעשה התכולה הרגילה של הבניינים, התלויה כמובן בייעודם. גם התקנים הדנים בעמידות אש ובתגובת רכיבים מבניים שונים בשריפה מתייחסים לשריפות רגילות כאלה. כיום לא קיימים למעשה נתונים אמניים על השפעות של שריפות מהסוג העלול להתפתח למשל כתוצאה מנגיפה של רכב הנושא כמות גדולה של חומרים דליקים בבניין ו/או כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקומת קרקע של בניין או בחניון תת קרקעי של בניין. יחד עם זאת ניתן לקבוע שהאפקטים של שריפות כאלה צפויים להיות חמורים במידה משמעותית מאלה של שריפות רגילות, הן בגלל

מטען האש המשמעותי והקושי לכבות שריפות כאלה במהירות, והן בגלל הנזק התחילי הנגרם לרכיבים המבניים השונים של הבניינים הנדונים, הנפגעים תחילה כתוצאה מהנגיפה המכנית ו/או מהפיצוץ, כמתואר לעיל.

לאור התגברות איומי הטרור מהסוג הנדון יש מקום להעמקת הלימוד והחקירה של סוגיות אלה.

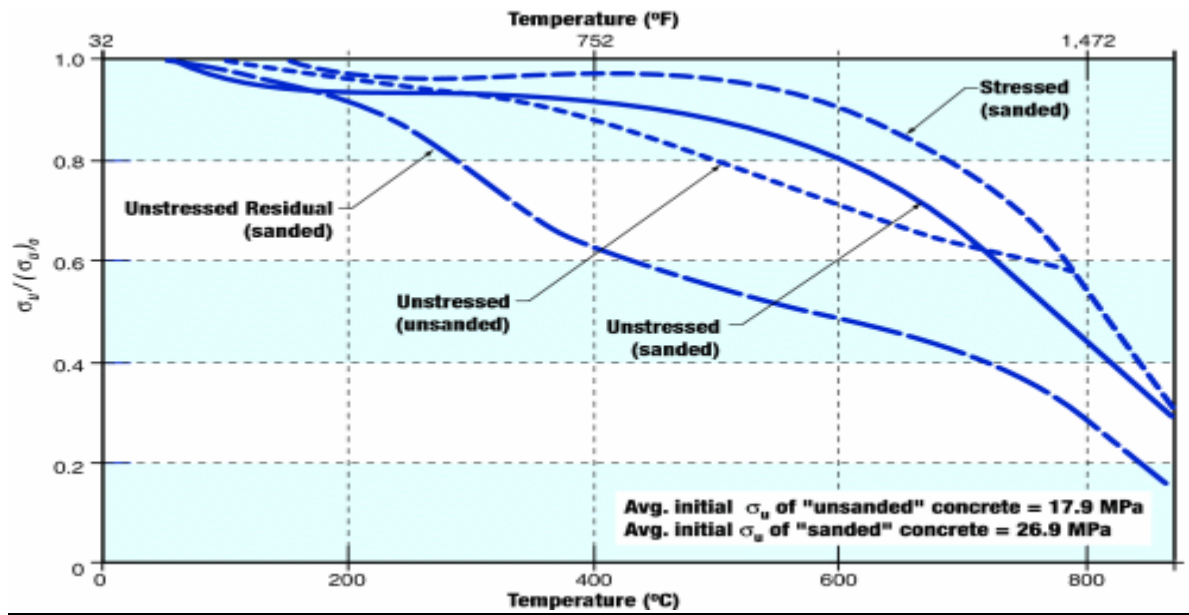


איור 2.15: השתנות גבול הכניעה של פלדות בתלות בטמפרטורה – על פי Lie (1992) [23]



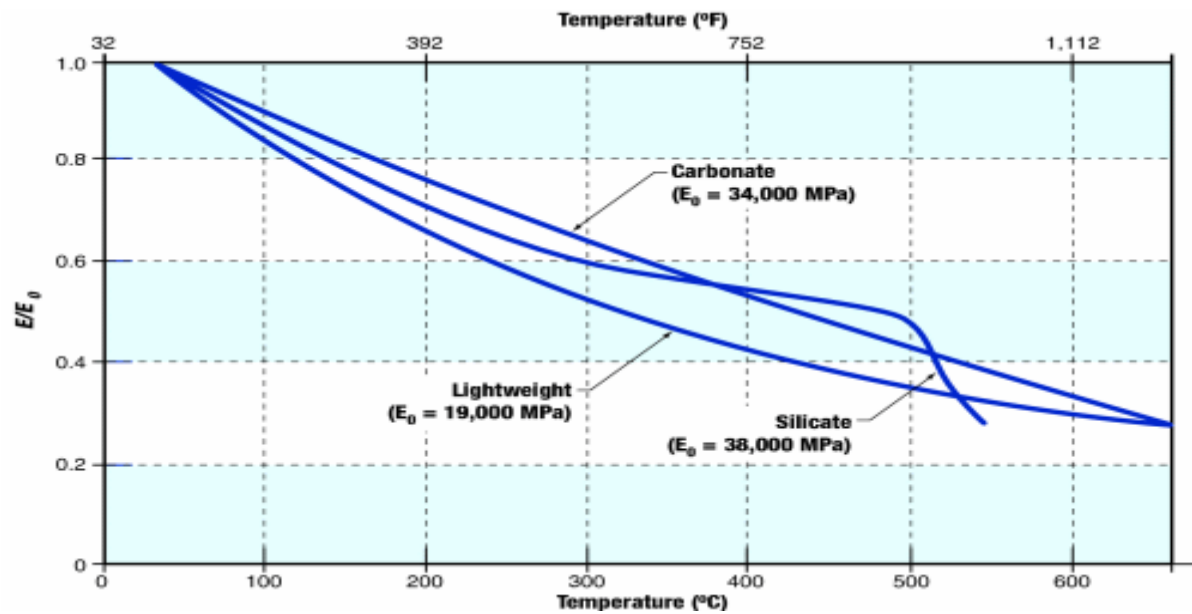
איור 2.16: השתנות מודול האלסטיות של פלדות קונסטרוקציה ושל פלדות זיון בתלות

בטמפרטורה- על פי SFPE (2000) [24]



איור 2.17: השתנות חוזק הלחיצה של בטונים שונים בתלות בטמפרטורה –

על פי (Kodur & Harmathy (2002) [25]



איור 2.18: השתנות מודול האלסטיות של בטונים שונים בתלות בטמפרטורה –

על פי (Kodur & Harmathy (2002) [25]

פרק 3 – מאפיינים עיקריים של הבנייה למגורים בישראל

3.1 כללי

בכדי להעריך את העמידות של הבנייה הקיימת למגורים בישראל בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור יש צורך בהיכרות עם סוגי הבניה השונים ובהבנת הנתונים שלהם שעשויה להיות להם השפעה על עמידותם בפני האיומים הנ"ל. פרק זה כולל סקירה תמציתית של טיפוסים הבניינים למגורים שנבנו במשך השנים בישראל, בראייה כלל ארצית, כצעד להשגת היכרות זאת. סקירה זו מתמקדת בהיבטים אדריכליים ומבניים, תוך התייחסות לטכנולוגיות הבנייה שהיו נפוצות בתקופות שונות, ולהתפתחות במשך הזמן של חוקים, תקנות ותקינה בתחומים השונים.

מובן מאליו כי לא ניתן לבצע מלאכה זו באופן מקיף כמשימה אחת מני רבות של המחקר הנדון, אלא באופן חלקי וראשוני בלבד. ביצוע משימה כזאת בשלמותה מחייב מחקר בפני עצמו, לא רק בגלל היקף העבודה העצום וכמות המידע המצוי, אלא גם בגלל היעדר מידע חיוני והצורך להשלימו כמידת האפשר. כך למשל, התייעוד של טיפוסים הבניינים למגורים בישראל נעשה רק בתקופות בנייה מסוימות, עבור חלק מכלל הבנייה, ובדרך כלל רק עבור בניינים שנבנו ביוזמת הממשלה. לצורך השלמת המידע החסר נסקרו הגורמים השונים שיש להם השפעה על עמידותם של בנייני המגורים הקיימים כיום בישראל בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור, כגון המאפיינים המבניים והלא מבניים הישימים של הבנייה בישראל, ההנחיות וההוראות של הליכי התכנון שהיו מקובלות בתקופות השונות וכיו"ב. נתונים מסוימים נוספים לגבי הבנייה למגורים הקיימת בישראל ניתן למצוא בדו"ח מחקר בנושא תרחישי נזק חזויים ברעידות אדמה אשר נערך במסגרת המכון הלאומי לחקר הבנייה [26].

בפרק זה נסקרות בקצרה שיטות הבנייה העיקריות שהיו נהוגות בישראל בתקופות השונות. כמו כן, נסקרת התפתחות החקיקה והתקינה הישימה בישראל על ציר הזמן. סקירות וניתוחים אלו עשויים לסייע בהערכת גדלים ומידות אופייניים, בתלות במשתנים שונים, וכן בהערכת תחומי ההשתנות של המאפיינים השונים, כגון סוגים של חומרי הבנייה העיקריים ששימשו בתקופות שונות לבניית בנייני מגורים בישראל ותכונותיהם (למשל חוזק), שיש להם השפעה על עמידותם בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים. אלה מוצגים בחלק האחרון של פרק זה.

3.2 מאפייני שיטות הבנייה העיקריות בבנייה למגורים בתקופות

שונות

מרבית בנייני המגורים הקיימים כיום בישראל נבנו במהלך המאה ה-20, בעיקר לאחר הקמת המדינה. לאור זאת, במרבית הבניינים האלה ניתן למצוא שימוש בבטון מזויין בהיקף זה או אחר. התפתחות הבנייה למגורים בישראל, לפני הקמת המדינה ובמיוחד לאחר מכן, קשורה לגידול האוכלוסייה של המדינה. גידול זה אינו אופייני לאופן גידול האוכלוסייה המקובל במדינות אחרות, אלא קשור במידה ניכרת לגלי העלייה השונים לישראל, הן לפני הקמת המדינה

וגם לאחר מכן [26]. גל עלייה מסיבי אחרון שהשפיע רבות על הבנייה למגורים בישראל ועל אופייה היה גל העלייה ממדינות חבר העמים בתחילת שנות ה-90 של המאה ה-20. סיכום תמציתי של המאפיינים האדריכליים הבסיסיים של הבנייה למגורים בישראל, בתלות בתקופה בהם הם נבנו מוצג בטבלה 3.1 להלן.

טבלה 3.1 : התפתחות הבנייה למגורים בישראל בתלות במאפיינים אדריכליים בסיסיים [26]

סוג המבנה	תיאור
בנייני מגורים בשיכונים/שכונות מגורים צמודי קרקע	בניינים שניבנו בשנות ה-20 של המאה ה-20, לרוב בניינים עד שתי קומות, בירושלים (רחביה, בית הכרם, רוממה), חיפה (הדר הכרמל), רמת גן, בני ברק, הרצליה, נתניה וכו'.
בנייני מגורים בשכונות פועלים	בתים חד קומתיים שניבנו בשנות ה-20 וה-30 של המאה ה-20 בת"א (שכונת בורוכוב) ושכונות פועלים דומות שניבנו ע"י המרכז לשכונות עובדים (חברת שיכון) בקריית חיים, חולון, קריית עמל.
בנייני מגורים על גבי קומות עמודים	בניינים שניבנו החל מתחילת שנות ה-30 של המאה ה-20, בעיקר בת"א ובשיכונים העולים שהוקמו בכל רחבי הארץ.
מעונות עובדים	בנייני מגורים על גבי קומות עמודים שכללו בניינים משותפים בני 2-3 קומות שניבנו ע"י המרכז לשכונות עובדים (חברת שיכון) בקריית חיים, חולון, קריית עמל.
"השיכון הישראלי הטיפוסי"	מאופיין בדגם הבית המשותף בן 3-4 קומות שניבנה בעיקר לאחר הקמת המדינה. לדוגמא, בין השנים 1945-1948 ניבנו כ-8,000 יחידות דיור מסוג זה המהוות 44% מכלל יחידות הדיור שנבנו באותו זמן, ע"י חברות ציבוריות, ממשלתיים ועירוניות, כגון עזרה וביצרון בת"א, רסקו, החברה לשיכון עממי והמחלקה הטכנית של הסוכנות היהודית.
שיכונים הומוגניים	בנייני מגורים המורכבים מדירות בגודל אחיד ומוגבל, ומאופיינות בשני חדרי מגורים בבניינים שניבנו בשנים הראשונות לאחר הקמת המדינה ובשלושה עד ארבעה חדרים בשנים המאוחרות יותר.
בנייה ציבורית	בנייני מגורים המאפיינים בעיקר ערי פיתוח שניבנו בשנות ה-60 של המאה ה-20 ביוזמה ציבורית ובעלות משרד השיכון. בנייה זו מהווה קרוב למחצית מהדירות שנבנו במדינת ישראל עד שנת 1987.
בנייני מגורים הכוללים מקלטים וחדרי מדרגות מחוזקים מבטון מזוין	בנייני מגורים שניבנו בכל רחבי הארץ, החל מתחיל שנות ה-60 של המאה ה-20 והפכו לנחלת הכלל לאחר הכנסתם לתוקף של תקנות ההתגוננות האזרחית [2] בסוף שנות ה-60 של המאה ה-20.
בנייני מגורים עם מרחבים מוגנים	בנייני מגורים שניבנו בכל רחבי הארץ, החל מהכנסתם לתוקף של תקנות ההתגוננות האזרחית המחייבות בניית מרחבים מוגנים [6] - [4] החל משנת 1992.

כפי שניתן להתרשם מטבלה 3.1 בנייני מגורים רבים נבנו עם קומות עמודים פתוחות, לפחות באופן חלקי, זאת החל מתחילת שנות ה-30 של המאה ה-20. בנייני מגורים בסגנון זה נבנו בהיקפים גדולים בעיקר משנות ה-60 עד שנות ה-80 של המאה ה-20. דוגמאות אחדות לסגנון בנייה זה מוצגות באיורים 3.1-3.3 להלן. הסיבות לאימוץ של סגנון בנייה זה בישראל הינן רבות ומגוונות והן קשורות להתפתחות האדריכלות המודרנית (סגנון ה-Bauhaus ואדריכלות הבינלאומית) אשר תפסה תאוצה החל משנות ה-20 של המאה ה-20 במדינות שונות באירופה ויובא לארץ על ידי אדריכלים שעלו ארצה, בעיקר לאחר עליית השלטון הנאצי בגרמניה. סגנון בנייה זה מתאים עקרונית גם לאקלים הים תיכוני החם, מכוון שהוא מאפשר זרימת אוויר חופשית בקומות העמודים הפתוחות של הבניינים הנדונים, דבר שטרם לשיפור האקלים של בניינים אלה, בתקופות בהן השימוש במערכות מזוג אוויר טרם היה מקובל.



איור 3.1 : בית-אנגל- הבית הראשון על עמודים בת"א ; אדריכל זאב רכטר



איור 3.2 : מעונות הוד –אב טיפוס לשיכון, ת"א 1936, אדריכל אריה שרון



איור 3.3 : חזית קדמית של בניין שיכון אופייני שנבנה בשנת 1965 בחיפה

מן הראוי לציין כבר בשלב זה שבניינים הכוללים קומות עמודים פתוחות הינם רגישים במיוחד להשפעות של איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים המפורטים בפרק 2 לעיל, זאת בנוסף לרגישותם הגבוהה להשפעה סיסמית. הם עלולים להיות גם בעייתיים בכל הקשור למניעת התמוטטותם בשרשרת במקרים קיצוניים של פגיעה חמורה בעמודים של קומת העמודים הפתוחה.

כפי שצוין לעיל, אחד המאפיינים המובהקים של הבנייה למגורים בישראל היה שימוש נרחב בבטון מזוין במרבית בנייני המגורים הקיימים בישראל. זה נובע בראש וראשונה מאימוץ סגנונות האדריכלות המודרנית המוזכרים לעיל, כמו גם מהעדר תעשייה ומסורת בנייה מעץ או פלדה בישראל, בניגוד למקובל במדינות רבות אחרות, הן באירופה והן במקומות אחרים בעולם (בארה"ב, אוסטרליה, אסיה וכו'). במרבית המקרים קיים בבנייני מגורים בישראל שילוב כזה או אחר של רכיבי שלד מבטון מזוין (או בלתי מזוין) עם קירות בני נושאים או בלתי נושאים הבנויים מחומרים שונים (לבני סיליקט, בלוקי בטון חלולים, בלוקי בטון תאי מאושפר באוטוקלב (בלוקי איטונג) וכו'). מן הראוי לציין שהעמידות של קירות בני מהסוגים הנדונים בפני השפעות של איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים (הדף, רסס, חדירה וכו') הינה פחותה במידה משמעותית מעמידות רכיבי בטון מזוין בהשפעות אלה.

שינוי במאפייני המבנים בבנייה למגורים התרחש החל מתחילת שנות ה-60 של המאה ה-20, ובמיוחד לאחר כניסתן לתוקף של חוק ההתגוננות האזרחית ותקנות ההתגוננות האזרחית [3], [2] והחובה להתקין בכל בניין מקלט וחדרי מדרגות מחוזק/ים מבטון מזוין. בשנת 1992 נוספו בתקנות ההתגוננות האזרחית [3] הנחיות בדבר בניית מרחבים מוגנים שחייבו למעשה יצירת מגדלים מבטון מזוין בבנייני קומות בכלל ובבנייני מגורים בפרט. תקנות אלה עודכנו והורחבו מאז מספר פעמים [6] – [4] והן מתייחסות כיום למרבית הבנייה החדשה בישראל על ייעודיה השונים ולא רק לבנייני מגורים. רכיבי המיגון השונים המשולבים בבניינים מהווים בדרך כלל חלק משמעותי ולעתים אף עיקרי של מערכת ההקשחה של הבניינים בפני עומסים אופקיים, במיוחד בבנייני מגורים שנבנו בשלושים השנה האחרונות. לאור כל זאת ניתן לקבוע

שהמאפיינים של הבנייה למגורים הקיימת בישראל הינם לרוב שונים במידה משמעותית מאלה של בנייני מגורים הנבנים בארצות אחרות. לשוני זה יש משמעות בהיבטים שונים, ביניהם גם היבטים של עמידות בנייני מגורים קיימים בישראל בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים, כמפורט בהמשך דו"ח זה.

פירוט יתר של שיטות בנייה שהיו מקובלות בתקופות שונות בישראל, הן לפני קום המדינה והן בשנים שלאחר מכן, מוצג בדו"ח מחקר שנערך במכון הלאומי לחקר הבנייה בנושאים הקשורים לתרחישי נזק חזויים כתוצאה של רעידות אדמה [26]. נתונים לגבי שיטות הבנייה המקובלות בבנייני מגורים הכלולים בדו"ח זה יכולים לשמש בסיס גם לניתוח ההתנהגות החזויה של בנייני מגורים קיימים במקרה של היפגעותם עקב מימוש איום מלחמתי או איום טרור כלשהו.

בטבלה 3.2 להלן מוצגים באופן תמציתי נתונים עקרוניים לגבי מאפיינים הבסיסיים של בנייני מגורים הקיימים בישראל, בתלות בתקופת הבנייה שלהם. מטבלה 3.2 ניתן להסיק שמרבית בנייני המגורים הקיימים כיום בישראל הינם בניינים קונוונציונליים בעלי שלד מבטון מזוין עם קירות בני מבלוקי בטון חלולים או בלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלאב (בלוקי איטונג), עם או בלי קירות הקשחה מבטון מזוין (קירות של מקלטים, חדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים, ו/או מרחבים מוגנים דירתיים/קומתיים). רק חלק קטן יחסית של בנייני המגורים הקיימים בישראל הינם בניינים טרומים או מתועשים ברמות תיעוש שונות (לדוגמא בנייני מגורים עם קירות נושאים מבטון מזוין הבנויים בשיטת "טונלים" וכו').

טבלה 3.2 : שיטות הבנייה למגורים האופייניות בישראל בתלות בתקופת הבנייה [26]

תקופה	תיאור השיטה
התקופה העותומאנית	תקופה זו מתאפיינת בבנייה מאבן בעיקר באזורים עירוניים, עם קירות חיצוניים כפולים ברוחב גדול (60-100 ס"מ). בבניינים שנבנו במאה ה-19 ותחילת המאה ה-20 התקרות נתמכו ע"י קורות פלדה (ריילסים) ומעליהם הונחו לוחות עץ. בחלק השני של המאה ה-19 נעשה שימוש בגגות קמרונים מצולבים או כיפות. שיטות בנייה אלה איפשרו בנייה לגובה של 2-3 קומות ויצירת חללים פנימיים מצומצמים.
השלטון הבריטי	השימוש במלט ובטון הפך נפוץ ואפשר בנייה גבוהה יותר, אם כי בדרך כלל לא נבנו מבנים מעל 4 קומות. טכניקת הבנייה הנפוצה בתקופה זו כללה קירות נושאים מלבנים או בלוקים (סיליקט או בטון), יציקת תקרות מבטון מזוין הנסמכות על פרופילי פלדה או ישירות על גבי הקירות הנושאים ובניית גגות רעפים הנשענים על קונסטרוקציית עץ. באזורים הקרובים לים (חיפה, ת"א) נעשה שימוש בבטון "דבש" בלתי מזוין לבניית קירות נושאים, אשר שימש כתחליף לבלוקים ולסיליקט, ואילו באזור ירושלים נעשה שימוש בקירות מבטון בעובי של 20-30 ס"מ מחופים בשכבת אבן בעובי של 10-15 ס"מ.
1948-1955	בתקופה זו המשיכו בשימוש בשיטות בנייה מהתקופה העותומאנית והשלטון הבריטי, אולם ניכר גם שימוש בבלוקי בטון חלולים באיכות נמוכה. בבנייני שלד מבטון מזוין שהוקמו בתקופה זו נעשה שימוש בשיטת היציקה בתבניות סטנדרטיות של קירות ועמודים. כמו כן, נבנו בתי עץ ונעשו ניסיונות בבנייה באבני גביל ובלבני אדמה טבעיות שלא צלחו. בתקופה זו נעשה שימוש גם באלמנטים טרומיים שכללו בין היתר תקרה טרומית בשיטת "סיפונה" (בלוקים טרפזיים חלולים מבטון וביניהם צלעות בטון) ואגדים טרומיים מבטון לגגות משופעים.
1956-1960	בשנים אלה הבנייה התבססה בעיקר על השיטה הקונבנציונאלית של שלד בטון מזוין יצוק באתר עם קירות בני/קירות מילוי מבלוקי בטון חלולים או איטונג. כמו כן בתקופה זו (1957) הוקם המפעל הראשון לייצור רכיבים טרומים ע"י חברת סולל בונה והוחל בבנייה טרומה בישראל.
1961-1965	גם בתקופה זו הבנייה התבססה בעיקר על השיטה הקונבנציונאלית של שלד בטון מזוין יצוק באתר עם קירות בני/קירות מילוי מבלוקי בטון חלולים או איטונג. בתקופה זו הוקמו רוב המפעלים לבנייה טרומית ומפעלים לייצור בטון מוכן והוחל בבנייה טרומה למגורים בהיקפים משמעותיים. בתקופה זו הוחל גם בבניית מקלטים בבנייני מגורים.
1966-1967	תקופת מיתון זו אופיינה ע"י צמצום משמעותי מאוד של הבנייה בישראל. מרבית בנייני המגורים שנבנו בתקופה זו נבנו בשיטת בנייה קונוונציונלית שלודה מבטון מזוין יצוק באתר עם קירות בני/קירות מילוי מבלוקי בטון חלולים או איטונג. בתקופה זו צומצם באופן משמעותי השימוש בבנייה טרומה למגורים.
1968-1978	בסוף תקופה זו החלו פרויקטים של "בנה ביתך" ודומים להם וחלה עלייה בבניית בניינים צמודי קרקע, בבניינים מדורגים וקוטג'ים. בניינים אלה, כמו גם בנייני קומות המיועדים למגורים, נבנו ברובם בבנייה קונוונציונלית שלודה מבטון מזוין יצוק באתר עם קירות בני/קירות מילוי מבלוקי בטון חלולים או איטונג. בנייני מגורים שנבנו בתקופה זו כוללים לרוב מקלטים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים.
1979-2010	מרבית הבנייה למגורים שבוצעה בתקופה זו הינה בנייה קונוונציונלית שלודה מבטון מזוין יצוק באתר עם קירות בני/קירות מילוי מבלוקי בטון חלולים או איטונג, עם או בלי קירות בטון מזוין (מקלטים, חדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים, מרחבים מוגנים דירתיים/קומתיים). בשנים 1991/2 חל גידול ניכר, אם כי זמני בבנייה טרומה ובשיטות בנייה מתועשות שונות בבנייה למגורים.

3.3 תכן בנייני מגורים לאור תקנות ותקנים

3.3.1 כללי

לפני קום המדינה ומיד לאחר מכן כמעט שלא הייתה בנמצא ספרות מקצועית מקיפה בשפה העברית בתחום הבנאות, לשימוש המתכננים והבונים. כחריג בהקשר זה כדאי לציין מסמך יוצא דופן בשם "חוקת הבטון – הוראות לשימוש בבטון מזוין בבניינים", שיצא לאור בשנת 1946 מטעם עיריית תל אביב – מחלקת ההנדסה [27]. התייחסות מפורטת יותר למסמך זה מוצגת בסעיף 3.3.2 להלן. תכנון ותכן של בניינים הסתמך בדרך כלל על ידע אירופאי מארצות בעלות רמת טכנולוגיה מפותחת בשנים אלה (בטון קלנדר מגרמניה, חוקת הבטון האנגלית וכו'). טכניקות תכן גרמניות שימשו למשל לתכנון בנייני תחנות הכוח הראשונות בחברת החשמל ושימשו גם לתכן חלק מבנייני המגורים שנבנו בתקופת העלייה השלישית. תכנון בלגי או צרפתי שימש למשל את התעשיות הפטרו-כימיות שהתפתחו במפרץ חיפה ובחוף שמן בחיפה, ותכנון אנגלי שימש לבניית בנייני ציבור רבים בזמן המנדט הבריטי. בניינים ששרדו מסוף המאה ה-19 ותחילת המאה ה-20 ותוכניות המקוריות שנמצאו לחלק מן הבניינים מהתקופה זו מעידים על תכנון קפדני שבוצע על סמך ספרות ותקינה זרים, בעיקר של בנייני תעשייה ובנייני ציבור מיוחדים.

בנייני מגורים חד קומתיים שנבנו לפני קום המדינה והבניינים הארעיים שקמו מיד לאחריה נבנו לעתים קרובות ללא תכנון הנדסי מסודר, על סמך טכניקות מקומיות מסורתיות או דגמים ושיטות בנייה מיובאים כנ"ל.

בשנת 1945 הוקם מכון התקנים הישראלי שהוסמך להכין ולהפיץ תקנים בישראל. אחד המסמכים הראשונים שהמכון הפיץ הוא חוקת הבטון שהפכה לימים לתקן ישראלי ת"י 466, על מהדורותיו השונות [37] ÷ [28].

בתשי"א-1951 נחקק חוק ההתגוננות האזרחית [1]. חוק זה היווה את הבסיס להנחיות הבנייה המוגנת בישראל עבור האוכלוסייה האזרחית של המדינה וההוראות לגבי בניית מקלטים ודרכי הגישה אליהם.

חוק המהנדסים והאדריכלים נחקק בשנת התשי"ח-1958. חוק זה קובע חובת רישום ורישוי של מהנדסים ואדריכלים. זכאי להירשם כמהנדס או אדריכל מי שעומד בקריטריונים של הכשרה לימודית בארץ או בחו"ל כמפורט בסעיף 9 לחוק. זכאי להירשם כמהנדס או אדריכל רשוי מי שהיה רשום שלוש שנים, ועבד בענף שבו היה רשום בתקופה זו (סעיף 11 לחוק).

כעשור לאחר קום המדינה, הופצו הנחיות בשפה העברית על ידי אנשי מקצוע מהאקדמיה ועל ידי בעלי תפקידים במשרדי ממשלה שונים, למשל באגף השיכון. בשנים מאוחרות יותר כבר

הופקו לקחים מניסיון הבנייה שהצטבר בישראל בשנים שחלפו ועודכנו ההנחיות לתכנון. דוגמא להפקת לקחים והצעת טיפוס בניינים משופרים מופיעה בחוברת המכילה טיפוס אב של בנייני מגורים שהכין משרד השיכון בשנת 1965 [38].

את המסמכים המקצועיים העיקריים שהשפיעו על תכן הבניינים למגורים בישראל ניתן לסווג לשלושה תחומים שונים: תכן וביצוע השלד של בניינים מבטון מזוין, לרבות ביסוס בניינים, עומסים הפועלים על מבנים ומיגון אוכלוסייה. לכל אחד מהם יש השפעה כזו או אחרת על מידת העמידות של בנייני מגורים קיימים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור שונים. המסמכים הטכניים הישימים לתחומים עיקריים אלה מוצגים באופן תמציתי בסעיפים שלהלן.

3.3.2 תכן השלד של בניינים מבטון מזוין

להלן נסקרים בקצרה ובאופן כרונולוגי, מסמכים טכניים שונים המתייחסים לתכן השלד של בניינים בכלל ושל בנייני מגורים בפרט, אשר היו בשימוש בישראל בתקופות שונות. נתונים והנחיות המופיעים במסמכים אלה עשויים לסייע מאד בקביעת מאפיינים מבניים חשובים ולשחזור נתונים של הבנייה הקיימת בישראל לדורותיה. לנתונים כאלה יש חשיבות רבה בכל הקשור להערכת העמידות של בניינים קיימים בישראל בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים.

- חוקת הבטון – הוראות לשימוש בבטון מזוין בבניינים בהוצאת עיריית תל אביב – מחלקת ההנדסה [27]. מסמך זה פורסם בשנת 1946, וניתן ללמוד ממנו על סוגי החומרים ושיטות הבנייה שהיו נהוגות באותה תקופה (בטון מזוין, תקרות צלעות, תקרות מקשיות מתוחות בכיוון אחד ובשני כיוונים, תקרות מקשיות ללא קורות וכו'). מטרת המסמך הייתה גיבוש שיטה אחידה לשימוש בבטון מזוין בבניינים שנבנו באותה עת בישראל. המסמך התבסס על חוקת הבטון האנגלית שפורסמה בשנת 1934. המסמך מותאם לשיטת המאמצים המותרים וכולל הנחיות לגבי טיב החומרים, בדיקתם והחסנתם (אגרגטים, מים, בטון, פלדה), דרישות חוזק ונתונים ביחס למאמצים מותרים בבטון ובפלדה, בהתאם לסוג ההטרח וטיב הבטון/פלדה, דרישות והנחיות עבור תכן תקרות, קורות, עמודים וקירות (עובי כיסוי, קטרים מינימליים ומקסימליים של פלדת הזיון, פסיעת הזיון, זיון חלוקה בתקרות, חפיות, עוביים מינימליים וכו'), הנחיות לתכנון תקרות מתוחות בשני כיוונים, תקרות שטוחות ויסודות. בנוסף לכך, נכללת במסמך זה רשימת העומסים השימושיים הנדרשים לחישוב מבנים, על פי ייעודם, ערכי עומסי רוח הפועלים על גגות משופעים ועל קירות של מבנים, כמו גם ערכים של עומסי מחיצות. למרות הפורמט הצנוע של מסמך זה, ניתן לראות בו את האב טיפוס של מספר תקנים ישראלים (ת"י 466 – חוקת הבטון; ת"י 412 – עומסים אופייניים במבנים וכו') שפורסמו במהלך השנים לאחר הקמת המדינה.

- מדריך לאינג'ינר [39] - פרופ' שלמה אטינגן ערך בין השנים 1954-1970 סדרה של מדריכים פרקטיים במגוון נושאים טכנולוגיים, החל ממדעי היסוד ועד הנדסת חשמל. בהכנת המדריך נטלו חלק מיטב המומחים בתחומים השונים הכלולים בו, שפעלו באותה תקופה בישראל.

שלושה כרכים בסדרה זו הוקדשו לתחום הבנאות, כשהכרך הראשון בסדרה יצא לאור בשנת 1954. כל אחד מן הפרקים בכרכים השונים נכתב ע"י מומחים בתחום הנדון, רובם מהטכניון. הכרכים הנ"ל כוללים עקרונות פיזיקאליים בסיסיים, טבלאות תכן, איורים, הנחיות ונוסחאות חישוב פרקטיות במרבית הנושאים הקשורים בתכן בניינים, כולל חישוב הביסוס וחישוב מגוון רכיבי בטון, פלדה ועץ. ספרים אלה נמצאים בשימוש קהילת המהנדסים עד ימינו אלה, בזכות היקף החומר הגדול המצוי בהם ובהירותו.

- תקן ישראלי ת"י 466: חוקת הבטון (1962) [28] - תקן זה מהווה את חוקת הבטון והביסוס לגרסאות המאוחרות יותר של תקן זה, ולתכן מבני הבטון בארץ עד ימינו. בתקן זה מוזכר הצורך להתחשב, בין היתר, בעומסי רעידות אדמה בחישובי היציבות (סעיף 1.6.1.1 בתקן). חישובים על פי הנחיות תקן זה נערכים בשיטת המאמצים המותרים, בהנחה של התנהגות אלסטית של רכיבי הבניין השונים, תוך מתן היתר להגדלת המאמצים עד כדי 133% מהמותר, עבור מקרים של העמסה ע"י עומסי רוח או רעידות אדמה (סעיף 1.7.1 בתקן). בסוף התקן יש בו התייחסות להטרחות לפי שיטת "עומס השבר" שפותחה בהמשך לשיטות התכן המקובלות כיום של מצבים גבוליים. תקן זה, על חלקיו הישימים השונים, שופר, שוכלל ועודכן מספר פעמים במהלך השנים מאז הוא פורסם לראשונה [37] – [29] ומהווה את הבסיס לתכן מבני הבטון בישראל כיום. במהדורת התקן משנת 2003, קיימת, בין היתר, גם התייחסות לצמצום הסכנה להתמוטטות בשרשרת של בניינים. לסוגיה זאת יש חשיבות רבה בהקשר לעמידות בניינים בהשפעות קיצוניות, לרבות עמידות בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים.
- תקן ישראלי 940: ביסוס בניינים (1978) [40] - בתקן זה מוגדרים, בין היתר, קריטריונים לתכן הביסוס (פרק ב' בתקן) וערכי תכן בסיסיים לחישוב ביסוס למבנה, כגון מאמצי מגע מותרים בקרקעות שונות (לרבות סלעים) (טבלה 5 וטבלה 6 בתקן). הנחיות תקן זה מחליפות ומעדכנות הנחיות קודמות בנושא הביסוס שהיו נתונות בספרים ובמדריכים, כמו המדריך לאינג'ינר [39]. בשנת 2008 יצאה לאור מהדורה עדכנית של תקן זה [41].

3.3.3 מיגון אוכלוסייה

בסעיף זה נסקרים בקצרה מסמכים טכניים שונים המתייחסים לדרישות הטכניות הקשורות למיגון האוכלוסייה בפני איומים מלחמתיים ולתכן ולביצוע של רכיבי מיגון ושילובם בשלד של בניינים בכלל ושל בנייני מגורים בפרט, אשר היה בהם שימוש בתקופות שונות בישראל.

- חוק ההתגוננות האזרחית [1] ותקנות ההתגוננות האזרחית [6] – [2] - חוק ההתגוננות האזרחית פורסם בשנת 1951, ומאז עודכן מספר פעמים. בהתאם לחוק זה יש לבנות בישראל מקלטים. הידע והדרישות הטכניות בכל הקשור לתכנון ובניית מקלטים רוכזו בפעם ראשונה בתקנות ההתגוננות האזרחית משנת 1968 [2]. תקנות אלה עודכנו בשנת 1990 [3] ועוד מספר פעמים לאחר מכן, כמפורט להלן. הן כוללות מספר דרישות בסיסיות, חלקן הגדול גיאומטריות, ביחס למבנה המקלטים, לרבות מבנה של מקלטים המשולבים בבניינים רגילים, כגון בנייני מגורים ושל חדרי המדרגות המשמשים כדרכי גישה אליהם. אין התייחסות בתקנות אלה לסוגיות הקשורות לעמידות הכוללת של הבניינים בפני איומים מלחמתיים

ואיומי טרור, או בפני רעידות אדמה. כמו כן, אין בתקנות אלה כל התייחסות או דרישה בקשר לעמידות בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור של חלקי הבניינים הבלתי מוגנים. הדרישות הטכניות הכלולות בהן מתייחסות בראש וראשונה להבטחת עמידות מיגונית נאותה של החלקים המוגנים בלבד של הבניינים, בהם אמורים לשהות האזרחים בשעת חרום. בתקנות ההתגוננות האזרחית משנת 1968 [2] מוגדרות דרישות ביחס לחדרי מדרגות מחוזקים שיש לבנות בבניינים גבוהים ובבניינים רבי קומות. כמו כן, כלולות בהן דרישות בנוגע למגדלי ביטחון שיש לבנות במבנים רבי קומות הממוקמים בישובים עורפיים. בתקנות ההתגוננות האזרחית שפורסמו בשנת 1990 [3] מוגדרים שני סוגים של חדרי מדרגות: חדר מדרגות מחוזק עבור בניין שבו המרחק בין מפלס רצפת הקומה העליונה/תחתונה ובין רצפת הכניסה למקלט הוא בין 12-27 מ', וחדר מדרגות ביטחוני בבניין בו המרחק לעיל שווה או עולה על 27 מ'. שני הסוגים של חדרי מדרגות הנ"ל צריכים להיות מבטון מזוין יצוק באתר, ע"פ הדרישות הטכניות המפורטות בתקנות הנדונות. המשמעות המעשית של חדרי מדרגות אלה היא שבבניינים שאינם מוגדרים כבניינים גבוהים או רבי קומות לא נדרש בתקופת הפרסום של תקנות אלה חדר מדרגות מבטון מזוין.

בעקבות מלחמת המפרץ הראשונה גובשה מדיניות מיגון חדשה בישראל, על מנת לתת מענה לאיום ירי הטילים ארוכי הטווח ולמשך ההתראה הקצר. בשנת 1992 פורסם תיקון לתקנות ההתגוננות האזרחית [4], המתייחס לתכנון וביצוע מרחבים מוגנים קומתיים ודירתיים, בצורת תיבות בטון מזוין הבנויות זו מעל זו ורתומות אחת לשנייה בבנייני קומות, אשר יוצרות פיר/גרעין בטון מזוין לכל גובה הבניין. לפיר/גרעין בטון מזוין אלה יש בדרך כלל תפקיד חשוב במערכת ההקשחה של הבניין. בתקנות מפורטות דרישות גיאומטריות בסיסיות ביחס למרחבים מוגנים (עובי קירות, עובי תקרות ורצפות), גודל ומיקום פתחי דלתות וחלונות, כמו גם דרישות בהקשר לסוגי החומרים (הבטון ופלדות הזיון), כמויות זיון מינימליות, וכו'. התקנות כוללות איורים של פרטי הזיון במרחבים המוגנים (ריתום אנכי בין קירות לגג, ריתום אנכי בין רצפה לקירות, ריתום אופקי בין קירות, פרטי זיון מסביב לפתחים). על מנת לעודד דיירים בבניינים קיימים, שאינם כוללים מרחבים מוגנים, להוספת מיגון דומה, מאפשרות התקנות הוספת מרחבים מוגנים גם אם נוצלו כל אחוזי הבנייה (ויש בכך הקלה במגבלות שטח התוספת המותרת).

התיקון של תקנות ההתגוננות האזרחית שפורסם בשנת 1992 [4] כולל התייחסות לחדרי מדרגות בבניינים בהם קיימים מרחבים מוגנים. בשנת 1994 פורסם תיקון נוסף לתקנות אלה, המתייחס לתכנון וביצוע מרחבים מוגנים מוסדיים ולחדרי מדרגות בהם קיימים מרחבים מוגנים מוסדיים [5]. בשנת 1998 פורסם תיקון נוסף לתקנות הנדונות [6], המתייחס לתכנון וביצוע של מרחבים מוגנים קומתיים ודירתיים באזורים של קווי עימות. על פי תיקונים אלה של תקנות ההתגוננות האזרחית, החל משנת 1992 חלה חובה לבצע חדרי מדרגות מבטון מזוין גם בבניינים שאינם גבוהים או רב קומתיים. יחד עם זאת, אין בתקנות אלה התייחסות מפורשת לתגובה הכוללת של המרחבים המוגנים והמבנה השלם במקרה של פעולת העומסים השונים החזויים לפעול עליהם. בייחוד אמור הדבר לגבי שיתוף פעולה אינטגרלי של

המרחבים המוגנים עם יתר חלקי שלד הבניין. יש לציין, כי התקנות כוללות הקלות מסוימות ומאפשרות הקטנה בהיקף של קירות המרחבים המוגנים בקומת הכניסה של הבניינים לכדי 70% מהיקפם המלא בקומות האופייניות. הקלה זאת אמנם יכולה לסייע בתכנון מקומות החנייה בקומת הכניסה לבניין, אולם היא פוגעת בלי ספק בתסבולת הגזירה והכפיפה של חתך המוטרח ביותר של פיר המרחבים המוגנים. כמו כן, אין כרגע התאמה בין דרישות התקנות הנ"ל לדרישות ת"י 413 [42] בכל הקשור לסוגי פלדות הזיון, פרטי חפייה של הזיון וביחס לכמויות מזעריות של זיון אנכי בקצבות/פינות של רכיבי הקשחה, כדוגמת קירות הקשחה או פירים מבטון מזויין. אי התאמות אלה, לפחות בחלקן, תתוקנה עם פרסום תיקון מתוכנן נוסף של התקנות הנדונות, האמור להתבצע במהלך שנת 2010.

- התקן לבנייה קשיחה ולחדרי ביטחון [43] – פורסם בשנת 1978 על ידי מפקדת קצין הנדסה ראשי והוא מהווה עדכון ביחס למהדורה מוקדמת יותר של התקן משנת 1976. המסמך מתייחס, בין היתר, לבנייה אזרחית רגילה בישובים שהוגדרו בזמנו כישובי קו עימות. המטרות העיקריות של ההנחיות הכלולות בתקן זה הינן: לספק לאנשים המאכלסים את הבניינים הנדונים הגנה ראשונית בפני התקפות מלחמתיות, עד שתאפשר ירידתם למקלטים תת-קרקעיים ובמקביל להקנות לבניין רמת שרידות גבוהה בפני השפעות של כלי נשק שונים (עד לרמה של פגיעות קרובות של ארטילריה בינונית). על פי הנחיות אלה מעטפת הבניין צריכה להיות מבטון מזויין יצוק באתר, או מעטפת בטון מזויין מתועשת (שיטת הקרומים), או טרומה. ההנחיות כוללות הגדרות לגבי נתונים גיאומטריים בסיסיים הקשורים לתכן בניינים אזרחיים, במיוחד בכל הקשור למיקום ולגודל הפתחים במעטפת הבניינים הנדונים. בנוסף לכך, הן כוללות גם הנחיות לגבי סוגי החומרים (בטון ופלדות זיון), עוביים מזעריים של רכיבים מבניים (קירות חיצוניים, מחיצות פנימיות, רצפות, תקרות, גגות, עמודים וכו'). פרטי ההנחיות מתייחסים בראש ובראשונה לבנייה כפרית נמוכה צמודת קרקע, אם כי העקרונות ישימים גם לסוגי בנייה אחרים. התקן כולל גם הנחיות לבניית חדרי ביטחון, כתוספת לבניינים קיימים שלא נבנו מראש במתכונת של בנייה קשיחה.
- חוק התכנון והבנייה ותקנות התכנון והבנייה [7], [8], [44] - חוק התכנון והבנייה פורסם בשנת 1965 ומאז הוא והתקנות שנגזרו ממנו עודכנו מספר פעמים. תקנות התכנון והבנייה כוללות, בין היתר, הגדרות בקשר לתכן וביצוע בניינים וכן הגדרות של מושגים כגון: מקלט, מרחב מוגן, בניינים גבוהים ובניינים רבי קומות. כמו כן, כלולות בתקנות התכנון והבנייה הנחיות תכן גיאומטריות ביחס לחדרי מדרגות ובניינים גבוהים ובבניינים רבי קומות. בהיבט זה יש לציין כי קיים שוני בין ההגדרות בתקנות התכנון והבנייה ותקנות ההתגוננות האזרחית המתייחסות לגובה בנייני קומות ולחדרי המדרגות של בניינים אלה. בנוסף לכל אלה כלולות בתקנות התכנון והבנייה דרישות לחישובים הנדסיים הנחוצים להוכחת יציבותם של בניינים, תוך התייחסות לתקנים הישימים לסוגיות הנדונות. בכך הן מהוות חוליה מקשרת בין תקנות ההתגוננות האזרחית לתקנים המוזכרים בהמשך. בהקשר זה יש לציין כי תקנות התכנון והבנייה כוללות מגבלות שונות העומדות בסתירה לדרישות התקנים (תזוזה אופקית מירבית בחלקו העליון של הבניין, הסטה בין קומתית וכו').
- תקנים ישראליים - תקנים ישראליים ראשונים הדנים במיגון אוכלוסייה אזרחית ובמקלטים פורסמו בשנת 1953 (ת"י 71 [45], ת"י 73 [46], ת"י 76 [47]). תקנים אלה התייחסו למקלטים

תת קרקעיים ועל קרקעיים (ת"י 71, ת"י 73 בהתאמה). ת"י 76 כלל תוספת לשני תקנים אלה בכל הקשור לחומרים חלופיים לבטון מזוין היכולים לשמש לצורכי מיגון אוכלוסייה. בתקנים אלה אין דרישה לחדרי מדרגות מבטון מזוין בבנייני קומות הכוללים מקלטים. לאור זאת, תרומת תקנים אלה להבטחת העמידות הכוללת של בניינים אזרחיים רגילים בפני עומסים אופקיים, כגון עומסי הדף או עומסים סיסמיים הינה מוגבלת מאוד. אין מידע על היקף השימוש בתקנים אלה בטרם פרסום תקנות ההתגוננות האזרחית משנת 1968 [2]. בכל אופן, תקנים אלה אינם כלולים כיום בין התקנים הישראליים התקפים. בתקנים ישראלים אחרים ההתייחסות לתכן מקלטים ומרחבים מוגנים היא עקיפה בלבד ואין בהם התייחסות ישירה לסוגיות הקשורות לתכן מקלטים ומרחבים מוגנים, אלא הפנייה לתקנות ההתגוננות האזרחית המוזכרות לעיל. כמו כן, אין בתקנים ישראלים קיימים כל התייחסות מפורשת להבטחת עמידות החלקים הבלתי מוגנים של בניינים אזרחיים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור. התייחסות בלתי ישירה לנושא של התמודדות עם השפעות אפשריות שונות של מימוש איום מלחמתי זה או אחר, כמפורט בפרק 2 לעיל, ניתן למצוא בתקן ישראלי ת"י 466 – חלק 1 [32], בפרק הדן בנושא צמצום הסכנה להתמוטטות בשרשרת של בניינים שלודים מבטון מזוין.

• מקורות מידע נוספים:

- 0 בספרו של ד"ר א. רצון משנת 1963 [48] מוצגות דרישות ביחס למקלטים ודרכי גישה אליהם, לרבות חדרי מדרגות ומגדלי ביטחון בבנייני קומות בני 6 קומות לפחות. מגדלי הביטחון, חדרי המדרגות והמקלטים צריכים להיות בנויים מבטון מזוין. עבור בניינים בני 6-8 קומות ההנחיות מתירות חדרי מדרגות מלבנים או בלוקי בטון מלאים בעובי 20 ס"מ. המידע הכלול בספר זה מצביע על כך שגם בתקופה שלפני פרסום התקנות להתגוננות אזרחית בשנת 1968 [2] נבנו בישראל מקלטים בבניינים.
- 0 במדריך לתכנון וביצוע מרחבים מוגנים בהוצאת פיקוד העורף [49] כלולות פרשנויות והסברים לדרישות השונות הכלולות בתקנות ההתגוננות האזרחית, המלוות בדוגמאות תכן מעשיות. עיקר ההתייחסות במדריך זה הינה לסוגיות התכן האדריכלי והפונקציונאלי של מרחבים מוגנים. ההתייחסות של מדריך זה לסוגיות הקשורות לתכן השלד של מרחבים מוגנים ושל חדרי מדרגות ושילובם במערכת המבנית הכוללת של בניינים הינה מוגבלת ביותר.
- 0 דו"ח בן 2 כרכים המסכם מחקר שבוצע במכון הלאומי לחקר הבנייה ופורסם בשנת 2005 [9] [10], כולל התייחסות מפורטת לשילוב מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים בבנייני קומות, לצורך שיפור עמידותם ברעידות אדמה ובאיומים מלחמתיים. הכרך הראשון של הדו"ח כולל, בנוסף לסקירה מפורטת של הבסיס ההנדסי, העיוני והניסויי לשימוש במרחבים מוגנים, ניתוחים חישוביים השוואתיים שונים, לצורך בחינת מידת התרומה של פירי מרחבים מוגנים ושל חדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים לשיפור עמידותם של בנייני קומות בעומסים סיסמיים ועומסי הדף, כל זאת עם דגש על בנייני מגורים מהסוגים הנפוצים בישראל. הכרך השני של הדו"ח כולל הצעה להנחיות מוקדמות לתכן השלד של בנייני קומות הכוללים פירי מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים.

3.4 מאפיינים מבניים העיקריים של הבנייה למגורים בישראל

מרבית הבנייה למגורים הקיימת כיום בישראל לדורותיה, למעט בנייני מגורים ישנים שנבנו בתקופת השלטון העותומאני וחלק מהבניינים שנבנו במחצית הראשונה של המאה ה-20 בתקופת השלטון הבריטי בארץ ישראל, מתאפיינת ברובה המכריע בשלד מבטון מזוין, כמתואר בסקירה על התפתחות הבנייה למגורים בישראל (סעיפים 3.1-3.3 לעיל). מסקירה זו ניתן להסיק שבנייני מגורים שנבנו בתקופה העותומאנית אינם שלודים. הם מתאפיינים בקירות נושאים עבים יחסית (60-100 ס"מ) הבנויים מבלוקי אבן ותקרות הכוללות קורות פלדה עם לוחות עץ מעליהם. מן הראוי לציין כבר בשלב זה שעמידות בניינים מסוג זה בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים הינה מוגבלת למדי, בדומה לעמידותם הסיסמית המוגבלת מאוד. הסיבות לכך רבות וביניהן נציין את: היעדר יכולת התקרות של בניינים אלה לתפקד כדיאפרגמות אופקיות, תסבולת מוגבלת לכפיפה ולגזירה של הקירות הנושאים והיעדר אמצעים כלשהם לצמצום הסכנה להתמוטטות בשרשרת של בניינים מסוג זה.

בתקופת השלטון הבריטי השימוש במלט ובבטון נעשה זול ונפוץ, ונפתחו אפשרויות בנייה חדשות. האבן איבדה את מעמדה כמרכיב הנדסי עיקרי בבנייה. בנוסף לשימוש בבטון ובבטון מזוין התפתחה גם טכנולוגיית ההובלה וההנפה, אשר תרמו להגדלת נפחי הבנייה. השימוש בבטון ובבטון מזוין איפשר לבנות בתים גבוהים יותר, אם כי בתקופה זו לא נבנו בד"כ בניינים שגובהם עולה על 4 קומות (למעט בניינים באזורים הרריים, בהם לעיתים נבנתה קומת הכניסה במפלס הרחוב וניתן היה לרדת ממנה ולעלות ממנה מספר קומות ללא צורך במעלית). שיטות בנייה שהיו נפוצות בתקופה זו כללו הקמת קירות נושאים מלבנים או בלוקי בני (סיליקט או בטון), יציקת תקרות מקשיות מבטון מזוין הנסמכות על פרופילי פלדה, או ישירות על הקירות, ובניית גגות רעפים על קונסטרוקציה מעץ (בעיקר בבנייני מגורים נמוכים, צמודי קרקע שנבנו בישובים חקלאיים).

בבניינים רבים שנבנו בשנות ה-50-20 של המאה ה-20 בחיפה ובתל אביב, נוצלה הזמינות של חול הים והצדפים. אלה, בתוספת אבנים וכמות מועטה של צמנט, שימשו לייצור בטון "דבש" בלתי מזוין, אשר שימש כתחליף זול ונפוץ לבלוקי בטון ולבני סיליקט, לצורך ביצוע קירות נושאים, בעיקר במעטפת הבניינים. קירות אלה משמשים כרכיבים נושאים עיקריים בבנייה לא שלודה, או כרכיבים נושאים משניים/משלימים בשלד הבטון המזוין. לעומת זאת, בתים רבים שנבנו בירושלים מאמצע שנות ה-20 של המאה ה-20 ועד קום המדינה, כוללים קירות נושאים חיצוניים עשויים מגב בטון, בדרך כלל ללא זיון, בעובי של כ- 20-30 ס"מ, עם חיפוי שכבת אבן חיצונית בעובי של 10-15 ס"מ (שיטת "הבנייה הירושלמית"). מן הראוי לציין שקירות "דבש" וקירות "הבנייה הירושלמית" הבלתי מזוינים האלה מקנים קשיחות אופקית רבה לבניינים בהם הם משולבים. יחד עם זאת הם בעלי תסבולת כפיפה, גזירה ומשיכות מוגבלים למדי, דבר הפוגם הן בעמידות הסיסמית והן בעמידות בפני אימומים מלחמתיים ואיומי טרור של הבניינים בהם הם משולבים.

למרות העובדה שתקופות השלטון העותומאני והשלטון הבריטי בארץ ישראל נמשכו זמן רב, מרבית בנייני המגורים הקיימים כיום בישראל נבנו לאחר הקמת מדינת ישראל. הם מאופיינים בשיטות בנייה קונוונציונליות המתבססות על שלד בטון מזויין יצוק באתר. רק מיעוט קטן של בנייני מגורים קיימים בישראל כוללים קירות נושאים מאבן, לבנים או בלוקים למיניהם, ללא שלד מבטון מזויין, וגם אלה הינם ברובם המכריע בניינים נמוכים, צמודי קרקע, או בניינים בעלי מספר קומות מוגבל.

על מנת לאפשר ביצוע הערכות עמידות של בנייני מגורים קיימים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים, יש צורך בנתונים גיאומטריים ומבניים שונים לגביהם. נתונים אלה ניתן להשיג עבור כל בניין מגורים נבדק, על סמך תיעוד ומידע קיימים לגביו (חישובים, תכניות אדריכלות, תכניות שלד, תעודות של בדיקות תכונות של חומרי בנייה שבוצעו במהלך הבנייה וכו'), אם ניתן לאתר תיעוד כזה, או על סמך בדיקות לא פולשניות ו/או בדיקות פולשניות באתר הבניין הנבדק. לצורך המחקר הנוכחי נקבעו נתונים משוערים ממוצעים, על סמך ניתוח ביקורתי של נתונים ישימים שונים שנאספו ממקורות שונים במסגרת מחקר אחר שבוצע במכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון [26]. נתונים אלה מתייחסים הן לנתונים גיאומטריים ישימים לבנייני מגורים קיימים בישראל, שיש להם השפעה על עמידותם בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים, והן לתכונות החומרים ששימשו לבניית בנייני מגורים בישראל בתקופות שונות.

בטבלאות 3.3 – 3.5 מרוכזים עיקרי הפרמטרים בהם נעשה שימוש במסגרת השלב הנוכחי של המחקר והמקור שלהם. נתונים אלה נקבעו תוך התחשבות בנתונים ידועים על התפתחות הבנייה ותקני הבנייה בישראל, כפי שהוצגו לעיל (שיטות הבנייה העיקריות כפי שהיו מקובלות בישראל לאורך השנים, בעיקר בבנייה למגורים, מוצגות בטבלה 3.2 לעיל). חלק מהנתונים המוצגים בטבלאות 3.3 – 3.5 להלן, בעיקר הנתונים הגיאומטריים הבסיסיים הישימים לבנייני מגורים, מתאימים עבור כל שיטות הבנייה שהיו נהוגות בישראל בבנייה למגורים בתקופות השונות. יתר הנתונים, המתייחסים לתכונות חומרי הבנייה ולחוזקים האופייניים של חומרי בנייה מתאימים בעיקר עבור בנייה קונוונציונלית שלודת ולחלקים העשויים מבטון או בטון מזויין בבנייה לא שלודה, ובמידה מוגבלת יותר גם לבנייה טרומה. מכיוון שהבנייה הקונוונציונלית השלודה הינה שיטת הבנייה הנפוצה ביותר בישראל בבנייה למגורים, והרוב המכריע של בנייני מגורים הקיימים כיום בישראל נבנו בשיטות בנייה אלה, נתונים אלה יכולים לשמש בסיס להערכות עמידות בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים של מרבית בנייני המגורים הקיימים כיום בישראל.

לצורך הערכת חוזק הבטון בהתאם לשנת הבנייה של בניין קיים נלקחו בחשבון, בין היתר, ערכי חוזק שהתקבלו מתוך בדיקות של מדגמי בטון שניטלו מבניינים קיימים שונים שנבנו בעשורים הראשונים של המאה ה-20, זאת במסגרת בדיקות עמידות ברעידות אדמה של בניינים אלה, ובדיקות שבוצעו במסגרות אחרות. בבדיקות אלה נמצא כי חוזק הלחיצה בפועל של הבטון בבניינים שנבנו בתקופה זו נע בין ערכים של כ - 10-20 מגפ"ס. איכות הבטון שנדרשה ליציקת רכיבים מבטון מזויין עלתה במשך השנים. תקן ת"י 466 בגרסתו משנת 1975 [29] דרש חוזקי בטון

גבוהים יותר מאלה שנדרשו במהדורת התקן משנת 1962 [28]. אם ניקח בחשבון שהטמעת הדרישות הללו בענף הבנייה ארכה כ-5 שנים, ניתן להניח כי מתחילת שנות ה-80 של המאה ה-20 ואילך, חוזק לחיצה אופייני המקובל של הבטון עבור רכיבי בטון מזויין התאים לחוזק של בטון ב-30. לפיכך, ניתן להניח בשלב זה של המחקר ערך של $f_{ck} = 15 \text{ MPa}$ כחוזק לחיצה אופייני של הבטון לצורך הערכות חישוביות של עמידות בניינים קיימים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים, עבור בניינים שנבנו עד שנת 1960. ערך של $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ נקבע כברירת מחדל לחוזק לחיצה אופייני של הבטון בבניינים שנבנו בין השנים 1961-1979 ועבור הבניינים אשר מועד בנייתם לא ידוע, וערך של $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ נקבע עבור בניינים שנבנו לאחר תאריך זה (טבלה 3.5 להלן). בבחינה פרטנית של התסבולות בפועל של רכיבים מבניים בבניינים קיימים נהוג להשתמש, להבדיל מערכי חוזק התכן כנהוג בתכן בניין חדש, בערכי החוזק בפועל, אשר נקבעים על סמך בדיקות פולשניות ו/או בדיקות לא פולשניות מתאימות, כדי שההערכה תשקף בצורה אמينة, ככל הניתן, את התנהגותם האמיתית הצפויה באירועים קיצוניים, כדוגמת פגיעה מלחמתית או טרוריסטית בבניין קיים. כאשר מדובר על הערכת העמידות בפני איומים מלחמתיים או איומי טרור של מספר רב של בניינים קיימים, יש קושי רב בביצוע בדיקות כאלה בכל הבניינים הנבדקים. במקרה כזה אין מנוס מהסתמכות על ערכי חוזקי לחיצה ממוצעים של הבטון, כפי שמתקבלים מבדיקות מדגמיות, אם הן מתבצעות, או על ערכים מוערכים כמצוין לעיל.

כפי שצוין לעיל, השלד של מרבית בנייני המגורים הקיימים בישראל מאופיין על ידי שלד בטון מזויין קונוונציונלי יצוק באתר. השלדים של בניינים אלה כוללים לרוב:

- מערכת ביסוס רדודה או עמוקה, בתלות בתנאי הקרקע באתר הבניין ;
- עמודים מבטון מזויין במידות שונות שנקבעו לרוב משיקולים של הבטחת יכולתם לשאת את עומסי הכבידה החזויים לפעול עליהם ורק בחלק קטן יחסית של הבניינים משיקולים של הבטחת עמידותם בפני עומסים סיסמיים. לאור זאת, ברבים מבנייני המגורים, במיוחד הישנים יותר, מידות החתך של העמודים הינן מוגבלות למדי (20/20, 20/30, 20/40 ס"מ), נתון הפוגם בעמידות בניינים אלה בפני השפעות של איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים. עמודי הבניינים הנדונים מהווים לעתים, אם כי לא בכל המקרים, חלק ממערכת מסגרתית מישורית או מרחבית, המשלבת עמודים עם קורות בטון מזויין המתחברות אל העמודים באופן קשיח, תוך יישום פרטי זיון מתאימים, בקומות השונות של הבניינים הנדונים.
- קירות בטון מזויין או בלתי מזויין המהווים חלק ממערכת נושאת של עומסי הכבידה החזויים לפעול על הבניינים הנדונים ו/או חלק ממערכת ההקשחה שלהם. כפי שצוין לעיל, רק חלק מבנייני המגורים הקיימים בישראל כוללים בחלקים שונים שלהם (חדרי מדרגות מחוזקים או ביטחוניים, מרחבים מוגנים דירתיים או קומתיים, מקלטים וכו') קירות בטון מזויין, זאת בתלות בתקנות ההתגוננות האזרחית שהיו תקפות במועד תכנונם ובנייתם.

- קורות בטון מזויין המשמשות סמכים אנכיים לרצפות, תקרות וגגות של בנייני המגורים הנדונים והמיועדות לשאת בעיקר עומסי כבידה. קיומן או אי קיומן תלוי בראש וראשונה בסוג המערכת המבנית של הרצפות/התקרות/הגגות שבהם הן משולבות. כפי שצוין לעיל, קורות אלה מהוות לעתים, אם כי לא בכל מקרה, חלק ממערכת מבנית מסגרתית מישורית או מרחבית, יחד עם עמודי בטון מזויין של הבניינים הנדונים. מידות החתך של הקורות מוכתבות בעיקר על ידי מפתחי הגישור שלהן ועל ידי עומסי הכבידה החזויים לפעול עליהן. כפי שצוין לעיל, בבנייני מגורים ישנים שנבנו בתחילת המאה ה-20 ובשנות ה-20 וה-30 של המאה ה-20 היה נהוג לעתים להשתמש בקורות פלדה לתמיכת טבלות מקשיות של רצפות/תקרות/גגות של בניינים. קורות פלדה אלה נועדו לשאת עומסי כבידה בלבד במקרים בהם מפתחי הרצפות/תקרות/גגות היו גדולים יחסית.
- קירות נושאים ו/או קירות הקשחה מבטון מזויין. קירות מסוג זה ניתן למצוא לרוב בבניינים שנבנו לאחר פרסום תקנות ההתגוננות האזרחית המחייבות בניית מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים בשנת 1992 [4]
- רצפות, תקרות וגגות של בנייני מגורים שלודים קונוונציונליים מבטון מזויין, שנבנו בתקופות שונות, עשויות להיות מסוגים שונים כדלהלן:
 - o טבלות בטון מזויין מקשיות המגשרות בכוון אחד, הנשענות על מערכת קורות, בדרך כלל קורות בטון מזויין. כפי שצוין לעיל. בבנייני מגורים ישנים שנבנו לפני קום המדינה טבלות בטון מזויין מקשיות נשענות על קורות פלדה בעלות חתך I. לרוב עובי טבלות בטון מזויין מקשיות בבנייני מגורים קיימים מוגבל ל 10-15 ס"מ.
 - o טבלות בטון מזויין מקשיות מצולבות, הנשענות על מערכת קורות בטון מזויין. לרוב עובי טבלות בטון מזויין מקשיות בבנייני מגורים קיימים מוגבל ל 10-15 ס"מ.
 - o טבלות בטון מזויין מקשיות מצולבות ללא קורות, הנשענות ישירות על גבי עמודי בטון מזויין. לעתים טבלות אלה נשענות גם על גבי קורות לאורך שפותיהן. לרוב עובי טבלות בטון מזויין מקשיות מצולבות ללא קורות בבנייני מגורים קיימים הינו בגבולות של 15-20 ס"מ.
 - o רצפות, תקרות וגגות צלעות המגשרות בכוון אחד, הנשענות על מערכת קורות בטון מזויין. רכיבים אלה בבנייני מגורים קיימים כוללים במרבית המקרים טבלה עליונה דקה, לרוב בעובי 5 ס"מ וגופי מילוי מסוגים שונים בין צלעותיהן (בדרך כלל בלוקי בטון חלולים או בלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלאב – בלוקי "איטונג"). לרוב העובי הכולל של רכיבים אלה בבנייני מגורים קיימים הינו בגבולות של 20-30 ס"מ. לעתים קרובות הקורות המשמשות סמכים אנכיים של רצפות/תקרות/גגות צלעות, במיוחד קורות פנימיות הינן העובי תקרת הצלעות ואינן בולטות ממנה. שימוש בתקרות צלעות דו-קרומיות בבנייני מגורים הינו מוגבל מאוד.
 - o רצפות, תקרות וגגות ערוגות מצולבות, הנשענות על מערכת קורות בטון מזויין. רכיבים אלה בבנייני מגורים קיימים כוללים במרבית המקרים טבלה עליונה דקה,

לרוב בעובי 5 ס"מ וגופי מילוי מסוגים שונים בין צלעותיהן (בדרך כלל בלוקי בטון חלולים או בלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלאב – בלוקי "איטונג"). לרוב העובי הכולל של רכיבים אלה בבנייני מגורים קיימים הינו בגבולות של 20-30 ס"מ. לעתים קרובות הקורות המשמשות סמכים אנכיים של רכיבי שלד אלה, במיוחד קורות פנימיות הינן העובי הרכיב ואינן בולטות ממנו. שימוש ברצפות/תקרות/גגות ערוגות דו-קרומיות בבנייני מגורים הינו מוגבל מאוד. כחריג מכלל זה יש להתייחס לתקרות "פל-קל" הבלתי תקניות שלמרבית הצער היה בהן שימוש נרחב למדי בישראל, שלא כדיון, גם בבנייני מגורים, החל שנות ה-70 של המאה ה-20. למרות שאין מידע מלא, אמין ובדוק בנדון, יש לקוות תקרות פל-קל בבנייני מגורים קיימים מהוות רק חלק קטן מכלל השטח הגדול של תקרות קיימות מסוג זה.

0 רצפות, תקרות וגגות ערוגות מצולבות ללא קורות, הנשענות ישירות על גבי מערכת עמודים מבטון מזויין. רכיבים אלה בבנייני מגורים קיימים כוללים במרבית המקרים טבלה עליונה דקה, לרוב בעובי 5 ס"מ וגופי מילוי מסוגים שונים בין צלעותיהן (בדרך כלל בלוקי בטון חלולים או בלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלאב – בלוקי "איטונג"). באזורי ההשענה על ראשי העמודים, רכיבים אלה כוללים כותרות מקשיות מבטון מזויין בעובי זהה לעובי הרכיב. לרוב העובי הכולל של רכיבים אלה בבנייני מגורים קיימים הינו בגבולות של 20-30 ס"מ. שימוש ברצפות/תקרות/גגות ערוגות דו-קרומיות בבנייני מגורים הינו מוגבל מאוד. כחריג מכלל זה יש להתייחס לתקרות "פל-קל" הבלתי תקניות כאמור לעיל.

0 גגות קלים מקונסטרוקציית עץ או פלדה המקורים על ידי רעפים מסוגים שונים (רעפי חרס, רעפי בטון וכו'). גגות מסוג זה מקובלים בעיקר בבנייני מגורים נמוכים, חד או רב משפחתיים. גגות מסוג זה קיימים לעתים גם בבנייני קומות המשמשים למגורים, בעיקר בישובים עירוניים הרריים, כגון חיפה, ירושלים, טבריה, צפת וכו'. במרבית המקרים מחופה תחתית הקונסטרוקציה הנושאת של גגות מסוג זה בתקרות תותב דקות מסוגים שונים (תקרות "רביץ", לוחות גבס וכו').

טבלה 3.3 : ריכוז מדגמי של נתונים גיאומטריים אופייניים בסיסיים של בנייני מגורים קיימים.
על סמך התפתחות הבנייה למגורים, החקיקה והתקינה בישראל [26]

נושא	טווח שנים/נתון *	ערך/טווח ערכים	סימוכין/הערות *
שטח דירה ברוטו ממוצע	לפני 1965	53-78 מ"ר	שנתונים סטטיסטיים - למ"ס (1949-2001)
	1965-1974	78-99 מ"ר	
	1975-1984	90-107 מ"ר	
	1984-1995	107-123 מ"ר	
	אחרי 1995	123-127 מ"ר	
	שנת הבנייה לא	53-127 מ"ר	ברירת מחדל
מרחק בין מישקי הפרדה	לפני 1965	12-15 מ'	נתונים על טיפוסי בניינים אגף השיכון (1956), פרלשטין (1960), משרד השיכון (1965), עמידר (1970)
	1965-1974	12-20 מ'	
	1975-1984	20-25 מ'	
	1984-1995	20-30 מ'	
	אחרי 1995	25-40 מ'	
	שנת הבנייה לא	14-30 מ'	ברירת מחדל
רוחב דירה מינימאלי	לפני 1965	6 מ'	נתונים על טיפוסי בניינים אגף השיכון (1956), פרלשטין (1960), משרד השיכון (1965), עמידר (1970)
	1965-1974	6 מ'	
	1975-1995	7 מ'	
	אחרי 1995	8 מ'	
	שנת הבנייה לא	6 מ'	ברירת מחדל
מרחקים בין מרכזי עמודים בבניין (שטח העמסה של עמוד)	עמוד פנימי בבניין	$3 \times 3 \div 5 \times 5$ מ'	נתונים על טיפוסי בניינים אגף השיכון (1956), פרלשטין (1960), משרד השיכון (1965), עמידר (1970)
	עמוד בהיקף בניין	$3 \times 2 \div 5 \times 2.5$ מ'	
	עמוד פינתי	$2 \times 2 \div 2.5 \times 2.5$ מ'	
גובה ברוטו של קומות אופייניות בבנייני מגורים (מפני רצפה לפני תקרה)	מזערי-ק. מגורים	2.85 מ'	נתונים על טיפוסי בניינים אגף השיכון (1956), פרלשטין (1960), משרד השיכון (1965), עמידר (1970), חוק התכנון והבנייה (1965)
	ממוצע-ק. מגורים	3.00 מ'	
	מזערי-ק. קרקע	2.40 מ'	

פרוט מקורות מידע לגבי נתונים גיאומטריים אופייניים בסיסיים מוצג ב [26]

טבלה 3.4 : ריכוז מדגמי של נתונים גיאומטריים אופייניים בסיסיים בקשר לחדרי מדרגות ומרחבים מוגנים, על סמך התפתחות הבנייה למגורים, החקיקה והתקינה בישראל [26]

נושא	טווח שנים/נתון	ערך/טווח ערכים	סימוכין/הערות
מקלט וחדר מדרגות מחוזק עבור הפרש גובה נמדד ממפלס רצפת מקלט לרצפה של קומת מגורים אחרונה בין 12 ל 27 מ'	אחרי 1970	שטח נקי של חדר מדרגות : 11 מ"ר, רוחב מהלך מינימום 1.1 מ' עובי קירות 20 ס"מ	תקנות התגוננות אזרחית (1968) [2], חלקי הבניין יהיו רתומים אחד לשני, זיון מזערי 8@200/200 מ"מ
חדר מדרגות מבטון מזוין כנ"ל, אך להפרש גובה נמדד עד 12 מ' *	אחרי 1992 (עבור בניינים הכוללים מרחב מוגן)	כנ"ל	תקנות התגוננות אזרחית (1992) [4], אפשרות של צמצום היקף הקירות בקומת כניסה עד 70% מהיקף הקירות בקומות אופייניות.
מרחב מוגן דירתי (קומתי) ששטח מזערי לכל יחידת דיור ששטחו אינו עולה על 100 מ"ר (שטח רצפה עיקרי)	אחרי 1992	4 מ"ר שטח נטו מזערי **, עוביים בס"מ : קיר חיצוני 25 (30) ס"מ, קיר פנימי 20 ס"מ, קיר משותף 15 ס"מ, רצפת ביניים 15 ס"מ, רצפה תחתונה ותקרה עליונה 20 ס"מ	תקנות התגוננות אזרחית (1992) [4], המשך קירות בקומת קרקע- לפחות 70% מהיקפם בקומה רגילה, פרטי זיון מפורטים לקירות, לתקרות, בהיקף הפתחים ולאופן הרתום נתונים בתקנות.
כנ"ל אך שטח הדירה עולה על 100 מ"ר (שטח רצפה עיקרי)	אחרי 1992	5 מ"ר שטח נטו מזערי **, השאר כנ"ל	

* נמדד ממפלס רצפת מקלט לרצפה של קומת מגורים אחרונה.

** על פי עדכון תקנות ההתגוננות האזרחית משנת 2010 שטח מזערי נטו של מרחב מוגן דירתי הינו 9 מ"ר.

טבלה 3.5 : ריכוז מדגמי של נתונים אופייניים בסיסיים בקשר לתכונות חומרי בנייה, על סמך התפתחות הבנייה למגורים, החקיקה והתקינה בישראל

נושא	טווח שנים/נתון	ערך/טווח ערכים	סימוכין/הערות
סוג הבטון/חוזק לחיצה אופייני של בטון f_{ck}^*	עד 1961	ב-15 (15 MPa)	אטינגן (1954) [39]
	1961-1979	ב-20 (20 MPa)	ת"י 466 (1962), [29], [28] (1975)
	1980 ואילך	ב-30 (30 MPa)	ת"י 466 (1987), [30], [31] (2003, 1998), [32]
תכונות פלדת זיון – מוטות מפותלים	עד שנת 1980 לזיון אורכי בקורות	$f_{y-\chi} = 400$ MPa כניעה	ת"י 466 (1962), [29], [28] (1975)
		$f_{su-\chi} = 480$ MPa קריעה	
		10% $\varepsilon_{su-\chi}$ עיבור קריעה	
תכונות פלדת זיון – פלדה מעורגלת חלקה	עד שנת 1980 לזיון אורכי בעמודים ; עד 1990 זיון חישוקים	$f_{y-\phi} = 220$ MPa כניעה	ת"י 466 (1987), [30], [31] (2003, 1998), [32]
		$f_{su-\phi} = 370$ MPa קריעה	
		18% $\varepsilon_{su-\phi}$ עיבור קריעה	
תכונות פלדת זיון מצולעת	משנת 1981 לזיון אורכי בקורות ובעמודים, ומ 1991 ועד היום זיון חישוקים	$f_{y-\Phi} = 400$ MPa כניעה	
		$f_{su-\Phi} = 500$ MPa קריעה	
		12% $\varepsilon_{su-\Phi}$ עיבור קריעה	
תכונות פלדת זיון – רשתות פלדה משוכות בקר	משנת 1980 לזיון תקרות וקירות בטון מזוין	$f_{y-\Psi} = 500$ MPa כניעה	ת"י 466 (1975), [32], [31], [30], [29] (2003, 1998, 1987)
		$f_{su-\Psi} = 600$ MPa קריעה	
		7% $\varepsilon_{su-\Psi}$ עיבור קריעה	

* חוזק אופייני בלחיצה של קובייה ישראלית תקנית 10/10/10 ס"מ.

למרות ניסיונות התיעוש שנערכו בתקופות שונות, כמפורט בסעיף 3.2 לעיל, רק חלק קטן יחסית של בנייני המגורים הקיימים בישראל כוללים שלד טרום מבטון מזוין או בטון דרוך. עם השנים נוסו גם שיטות תיעוש שונות, המשלבות בצורה זו או אחרת, רכיבי שלד יצוקים באתר עם רכיבי בטון טרומים מסוגים שונים, לדוגמא תקרות טרומות, תקרות מתועשות (שיטת הקרומים), קירות נושאים טרומים או מתועשים וכו'. מן הראוי לציין שחלק בלתי מבוטל של בנייני מגורים אלה נבנו בשנות ה-60 וה-70 של המאה ה-20, בתקופות שבהן עדיין לא הייתה קיימת בישראל מודעות לצורך בהבטחת עמידות בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים של בניינים בכלל

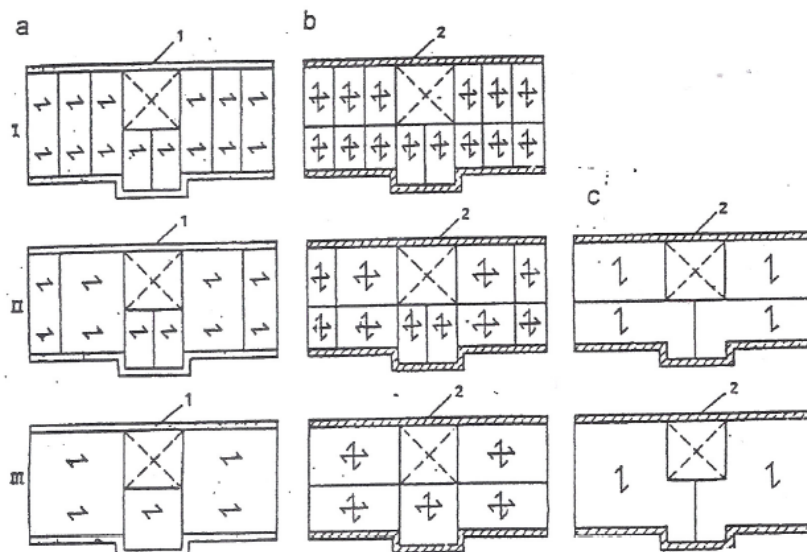
ושל בנייני מגורים בפרט. כמו כן, בתקופות אלה עדיין לא הייתה קיימת בארץ מודעות לצורך בהבטחת עמידות סיסמית נאותה של בניינים. בנוסף לכל אלה, בתקופות אלה לא הייתה קיימת עדיין מודעות לסכנות של התמוטטות בשרשרת של בניינים בכלל, ושל בניינים טרומים בפרט, ולא היו קיימים תקנים המחייבים נקיטת אמצעים לצמצום הסכנה להתמוטטות בשרשרת של בניינים. כל המגבלות האלה פוגמות בעמידות בנייני מגורים טרומים בפני איומים מלחמתיים ואיומי מטרור ישימים שונים.

בטבלה 3.6 להלן מוצגים סוגים שונים של מערכות מבניות מקובלות בבנייני מגורים טרומים קיימים בישראל. המערכות המבניות הנפוצות הנ"ל מוצגות באופן עקרוני גם באיור 3.4 להלן.

טבלה 3.6 : סוגי מערכות מבניות נפוצות בבנייני מגורים טרומים ; על פי ארטישצ'ב (2003) [50]

מס'	מערכת מבנית	תיאור
1	מערכת קירות נושאים לרוחב הבניין	(איור 3.4a) מערכת זו כוללת קירות נושאים לרוחב הבניין במרחקים שונים ושני קירות חיצוניים לאורך הבניין שאינם נושאים.
2	מערכת קירות נושאים לרוחב וקירות נושאים פנימיים לאורך הבניין	(איור 3.4 b) מערכת זו כוללת קיר נושא פנימי אחד או יותר לאורך הבניין, ביחד עם קירות נושאים לרוחב הבניין. הקירות החיצוניים לאורך הבניין יכולים להיות נושאים או לא נושאים.
3	מערכת קירות נושאים לאורך הבניין	(איור 3.4 c) מערכת בה כל הקירות האורכיים (חיצוניים ופנימיים) הם נושאים, הקירות לרוחב מהווים מערכת הקשחה לכוחות אופקיים ואינם מיועדים לשאת עומסים אנכיים.
4	מערכת משולבת	מערכת זו משמשת בבניינים בעלי תוכניות מיוחדות בתנוחה אופקית, בהן אין הבדל בין הקירות לאורך ולרוחב הבניין. ישנה עדיפות לסוג מבנה זה באזורים סיסמיים.

1. קומת המסד ו/או קומת קרקע בבניינים טרומיים יכולה להיות מורכבת מקומת עמודים מפולשת יצוקה באתר.
2. קירות החוץ (נושאים או לא נושאים) הם ע"פ רוב קירות כריך בעובי כולל של כ-20 ס"מ, כאשר השכבה הפנימית היא בדרך כלל השכבה הנושאת בעובי של כ-10 ס"מ.
3. קירות הפנים הם לרוב קירות נושאים בחתך מלא בעובי של 15-20 ס"מ.



מערכות נפוצות של קירות במבנים טרומים :

a – מערכות עם קירות נושאים לרוחב הבניין ; b – מערכות עם קירות נושאים לרוחב וקיר נושא אחד לאורך הבניין ; c – מערכות עם קירות נושאים לאורך הבניין ; I – מפתחים קטנים בין הקירות ; II – מפתחים בינוניים בין הקירות ; III – מפתחים גדולים בין הקירות ; 1 – קיר/ספין חיצוני לא נושא ; 2 – קיר/ספין חיצוני נושא

איור 3.4 : מערכות מבניות נפוצות במבנים טרומים ; על פי ארטישצ'ב (2003) [50]

בין הרכיבים הטרומיים העיקריים שניתן ומקובל ליישם בבנייני מגורים ניתן לציין את הרכיבים הבאים :

א. תקרות

1. רכיבי תקרות טרומות מקשיות מבטון מזוין – רכיבים אלה הם לרוב בעובי של 13-20 ס"מ. בד"כ הם רכיבים מלבניים בגודל חדר (שטח של 10-15 מ"ר) הנשענים על קירות נושאים. יצוין כי השימוש בתקרות אלה הולך ומצטמצם בשנים האחרונות.
2. לוחות חלולים דרוכים (לוח"דים) – שימוש בלוח"דים בבנייה למגורים מוגבל מאוד. רוחב הלוח"דים הוא ע"פ רוב 0.90, 1.20 או 2.70 מ' ואורכם/מפתחם בדרך כלל עד 12 מ', אם כי קיימים גם לוח"דים באורך/מפתח עד 16 מ'. העובי וזיון הדריכה של הלוח"דים נקבעים ע"פ מפתח הרצפה/התקרה ועומס התכן החזוי לפעול עליהם. בדרך כלל (בעיקר בשנים האחרונות) מוסיפים על פני הלוח"דים יציקה משלימה מבטון מזוין בעובי של כ- 5 ס"מ. השלמת היציקה מקנה קשיחות גבוהה של התקרה במישורה, ויעילה יותר ביישום מחברים אנכיים ואופקיים בין רכיבי התקרה הטרומים. ללא השלמת היציקה התקרות הטרומות הנ"ל מאופיינות בקשיחות נמוכה במישורן.
3. רכיבי קרום טרומים – רכיבים אלה עשויים לוחות דקים של בטון מזוין או בטון דרוך, בדרך כלל בעובי 5-7 ס"מ, עליהם יוצקים באתר הבנייה שכבת בטון מזוין משלימה, לצורך

יצירת חתך מרוכב מבטון מזוין, האמור לדמות במידה רבה התנהגות של תקרות בטון מזוין מקשיות.

ב. קירות

1. קירות חוץ טרומים - רכיבים אלה יכולים לשמש כקיר מסך שאינו נושא או כקיר נושא. רוחב הקירות הוא בד"כ רוחבו של חדר אחד או של שני חדרים. מבחינים בין קירות חד שכבתיים הכוללים שכבת בטון אחת עם גימור חיצוני, לבין קירות "כריך" (בדרך כלל בעובי כולל של כ-20 ס"מ), עם 2 שכבות בטון מזוין (פנימית בעובי כ-10 ס"מ) וביניהן חומר לבידוד תרמי. ברכיבי כריך אלה, המשמשים כקירות נושאים, השכבה החיצונית בדרך כלל אינה נושאת, אלא רק השכבה הפנימית משמשת לכך. על מנת להבטיח את קשיחות הקירות הנושאים נדרשים מישקים אנכיים מיוחדים בין הרכיבים הטרומים של הקיר. שימוש העיקרי של הקירות הטרומים שאינם נושאים הוא לסגירת חללי הבניין, כאשר בבניינים כאלה המערכת המבנית הנושאת מושתתת בדרך כלל על שימוש בשלד בטון מזוין יצוק באתר, הכולל קירות נושאים/קירות הקשחה ו/או מערכת מסגרתית של עמודים וקורות מבטון מזוין קונוונציונלי יצוק באתר. קיימים גם מקרים בהם יש שילוב של קירות טרומים נושאים ובלתי נושאים בבניין. מן הראוי לציין, שבגלל קשיחותם הרבה של הקירות במישורם גם קירות טרומים בלתי נושאים מקנים קשיחות אופקית משמעותית למבנה, גם אם הם לא נועדו מראש לשמש כרכיבי הקשחת הבניין. כמו כן, קירות חוץ טרומים מבטון מזוין, גם אם הם אינם קירות נושאים, יש להם יכולת עמידות כלשהי בפני השפעות שונות של איומים מלחמתיים ואיומי טרור מסוימים (הדף אוויר ורסס), זאת בגלל תכונות חומרי הבנייה המשמשים לייצורם (בטון מזוין) ונתונייהם הגיאומטריים (עובי הקירות, פרטי הזיון וכו').

2. קירות פנים טרומים – קירות אלה הם לרוב קירות נושאים בעלי חתך מלא (עובי כ-15-20 ס"מ) ומשמשים לנשיאת התקרות והקירות שמעליהם, כמו גם להקשחת הבניין לעמיסה אופקית. המרחקים המקובלים בין קירות נושאים אלה הוא בין 3-6 מ' (רוחב חדר).

3.5 מאפיינים עיקריים של מעטפות בנייני מגורים בישראל

במרבית בנייני המגורים הקיימים בישראל, שנבנו בשיטות בנייה קונוונציונליות כמפורט לעיל, המעטפת החיצונית כוללת קירות בני מסוגים שונים. הדבר נכון הן עבור בנייני מגורים שלודים והן עבור בנייני מגורים בלתי שלודים, שנבנו ברובם לפני קום המדינה וכוללים קירות נושאים. קירות הבני החיצוניים של בנייני המגורים הקיימים השלודים, נבנו לרוב תוך שימוש בבלוקי בטון חלולים או בבלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלאב (בלוקי "איטונג"). עובי קירות אלה הינו לרוב 20 ס"מ בלבד (למעט חיפויים חיצוניים ופנימיים). מן הראוי לציין שהקירות הפנימיים/המחיצות בבנייני מגורים קיימים עשויים לרוב מבלוקי בטון חלולים בעובי מוגבל של 7-10 ס"מ. רק קירות ההפרדה בין הדירות והקירות המפרידים בין יחידות הדיור השונות לבין השטחים הציבוריים של הבניינים הנדונים, כגון חדרי מדרגות, עשויים מבלוקי בטון חלולים או מלאים בעובי 15-20 ס"מ.

בבנייני מגורים ישנים בלתי שלודים, אשר נבנו ברובם לפני קום המדינה, קיימים קירות נושאים חיצוניים ופנימיים מלבני חמר או מלבני סיליקט מלאים. עובי קירות נושאים אלה הינו לרוב בגבולות של 20-30 ס"מ (ללא חיפויים חיצוניים ופנימיים).

רק בחלק קטן יחסית של בנייני המגורים הקיימים, המעטפת החיצונית כוללת קירות מבטון מזויין או קירות מבטון בלתי מזויין. הדבר נכון בעיקר לגבי בנייני מגורים טרומים, כמפורט בסעיף 3.4 לעיל. דוגמא אופיינית של בנייני מגורים טרומים הכוללים מעטפת של קירות נושאים ובלתי נושאים מבטון מזויין מוצגת באיור 3.5. הבניין המוצג באיור זה מתייחס לבניין מגורים טרום ישן יחסית שנבנה בשנות ה-70 של המאה ה-20. הקיר האטום הרוחבי באיור 3.5 הינו קיר נושא ואילו הקירות בחזיתות האורכיות של הבניין הכוללים את פתחי החלונות הינם במקרה הנדון קירות בלתי נושאים.



איור 3.5 : מעטפת חיצונית אופיינית מבטון מזויין בבנייני מגורים טרומים קיימים

בנוסף לבנייני מגורים טרומים ניתן למצוא קירות בטון מזויין בהיקף נרחב במעטפות של בנייני מגורים קיימים שנבנו בשיטות בנייה מתועשות שונות, כגון שיטת ה"טונלים". מן הראוי לציין שבבנייני מגורים שנבנו בשיטת בנייה זו, גם מרבית הקירות הפנימיים, שאף הם הינם קירות נושאים, עשויים מבטון מזויין. העובי של קירות בטון מזויין אלה הינו לרוב בגבולות של 15-20 ס"מ. כמובן שבבנייני מגורים חדשים יחסית, אשר נבנו החל מתחילת שנות ה-90 של המאה ה-20, ניתן למצוא קירות בטון מזויין בחלקים שונים של מעטפת הבניין. הכוונה לחלקי מעטפת הבניין המהווים חלק ממרחבים מוגנים ו/או חדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים. כפי שפורט בטבלה 3.4 לעיל, קירות בטון מזויין חיצוניים של מרחבים מוגנים הינם לרוב בעובי 25-30 ס"מ.

גם בבנייני מגורים ישנים יותר הממוקמים בישובי קו העימות ניתן למצוא לעתים חלקים של מעטפת הבניין הכוללים קירות בטון מזויין בעובי מוגבל (בדרך כלל 20 ס"מ). הכוונה לחלקי מעטפת הבניין של חדרי בטחון שנבנו לרוב כתוספות לבנייה קיימת, שנבנו לפני כניסתן לתוקף של תקנות ההתגוננות האזרחית המחייבות בניית מרחבים מוגנים בכל הקומות של בנייני המגורים [4-6].

נקודה נוספת הקשורה למעטפות של בנייני מגורים, שיש לה השפעה מסוימת על התגובה של בנייני מגורים להשפעות שונות של איומים מלחמתיים ואיומי טרור, הינה סוגיית החיפויים החיצוניים של מעטפות הבניינים הנדונים. החל מסוף שנות ה-80 הוחל בישראל בשימוש נרחב יחסית בחיפויים חיצוניים קשיחים של חזיתות בנייני מגורים (חיפויים קרמיים ובמיוחד חיפויי אבן), זאת בניגוד לחיפויי טיח חוץ שהיו מקובלים מאוד לפני כן. זה אמור הן לגבי הבנייה הקונוונציונלית והן לגבי הבנייה המתועשת והטרומה, המוזכרות לעיל. יש מקום להתייחס לחיפויים קשיחים אלה בניתוחי התגובה החזויה של חזיתות של בנייני מגורים קיימים לאפקטים שונים של איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים (הדף, רסס וכו').

כמפורט בסעיף 3.2 לעיל, באזורים שונים של המדינה היה מקובל בעבר גם שימוש במעטפות בניין הכוללות קירות נושאים מבטון בלתי מזויין, כגון קירות "דבש" שהיה בהם שימוש בעיקר באזור חיפה ותל אביב. קירות "דבש" אלה הינם לרוב בעובי 20 ס"מ בקירוב. כמו כן, באזורים שונים של המדינה, כדוגמא בירושלים, היה מקובל בעבר שימוש במעטפות בבנייני מגורים בקירות נושאים הכוללים שכבה חיצונית של אבן בעובי 10-15 ס"מ ושכבה פנימית של בטון בלתי מזויין בעובי 20-30 ס"מ.

פרק 4 – תגובת בניינים לפגיעה מלחמתית או פגיעת טרור

4.1 כללי

בדרך כלל, המידע הקיים בקשר לתגובת בניינים אזרחיים בכלל, ובנייני מגורים בפרט, לפגיעה עקב אירועי מלחמה או טרור, הינו מוגבל למדי, ורובו ככולו מסווג. מידע כזה מצוי בידי גורמי הביטחון והצבא המוסמכים. חלק ממידע זה מקורו בתיעוד פגיעות ונזקים שנגרמו לבניינים אזרחיים שונים במלחמות, באירועים ובתקריות אש מאז קום המדינה ועד היום. באירועים כאלה נערך סקר מקיף כבר במהלך האירועים או זמן קצר לאחריהם [51], [52], והמידע הנאסף עשוי לשמש להערכות ולהחלטות שונות. לפיכך רק חלק קטן ממידע זה יכול היה לסייע באופן ישיר למחקר הנוכחי, במגבלות המתאימות, לרבות מגבלות הצגתו, ואילו עיקר הניתוח המוצג להלן, ביחס לתגובת בניינים אזרחיים בלתי מוגנים בכלל ובמיוחד ביחס לתגובה של בנייני מגורים לאירועים קיצוניים שונים, עם דגש על פגיעות מלחמתיות ופיגועי טרור, מושתת בעיקר על מקורות מידע בלתי מסווגים שונים ועל מידע גולמי שפורסם בתקשורת. מגבלות המידע הנדון מחייבות גם כי עיקר הדיון בסעיפים שלהלן הינו בעיקרו איכותי ורק במידה מוגבלת גם כמותי. מקורות מידע נוספים שעמדו לרשותנו הם ממצאים בלתי מסווגים של ניסויים ומחקרים שונים בסוגיות הנדונות שנערכו בישראל בשנים האחרונות במסגרות שונות, במיוחד ע"י פקע"ר והמכון הלאומי לחקר הבנייה.

4.2 תגובת בניינים אזרחיים רגילים לפגיעה ישירה של רש"קים

שונים

פגיעה ישירה של רש"ק כלשהו במעטפת החיצונית של בניין אזרחי בלתי מוגן כלשהו, צפויה לגרום להינזקותו במידה כלשהי. חומרת הנזק שעלול להיגרם לבניין כזה תלויה מצד אחד בנתוני הרש"ק הפוגע: סוג הרש"ק, כמות חומר הנפץ ברש"ק, משקלו הכולל, מהירות וזווית הפגיעה, נתוני המעטפת של הרש"ק, נתוני המרעום, יכולת החדירה שלו וכו', כמפורט בפרק 2 לעיל. מצד שני, חומרת הנזק תלויה בנתוני המעטפת של הבניין הנפגע, במאפיינים החומריים והמבניים של המעטפת וברכיבים המבניים העיקריים. נתונים עקרוניים בקשר לסוגים ומאפיינים עיקריים של מעטפות בניינים ושל מערכות מבניות המקובלות והנפוצות בבנייני מגורים בישראל מוצגים בפרק 3 לעיל.

במקרים של פגיעה ישירה של רש"ק כלשהו בבניין אזרחי בלתי מוגן, ההשפעות העיקריות של פיצוץ הרש"ק אשר עלולות להשפיע באופן משמעותי על תגובת המבנה ועל חומרת הנזקים הצפויים ועל היקפם, הינם הדף אוויר, וכן השפעות הנגיפה, החדירה והרס המפורטות בפרק 2 לעיל. בנוסף לכמות חומר הנפץ ולגורמים נוספים המתוארים בפרק 2 לעיל, חומרת השפעות ההדף תלויה במיוחד במיקום מוקד הפיצוץ – האם הוא בצד החיצוני של מעטפת הבניין הנפגע במידה שמדובר בפיצוץ המתרחש מיד לאחר הפגיעה, או אם הוא מתרחש בתוכו (במקרה של חדירת הרש"ק דרך מעטפת הבניין בטרם התרחשות הפיצוץ). לגבי יכולת החדירה של רש"קים שונים למטרות שונות העשויות מחומרים שונים (בטון מזויין, קירות מבלוקי בני מסוגים שונים,

רכיבי פלדה וכו'), מן הראוי לציין שמעטפות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים כדוגמת בנייני מגורים קיימים בישראל, הינן בדרך כלל בעלות עוביים מוגבלים למדי, כמפורט בפרק 3 לעיל, והן עשויות מחומרים בעלי התנגדות מוגבלת ולעתים נמוכה לחדירה. יש הבדל כמובן בין פגיעה בקיר בני, שהתנגדותו לחדירה הינה מזערית לבין פגיעה בקיר מעטפת או בתקרה מבטון מזויין. בעוד שבמקרה הראשון עלולה להתרחש חדירה המלווה בהרס מקומי של קיר הבני, לפני התרחשות הפיצוץ, במקרה השני עלולה התנגדות הקיר מבטון מזויין לגרום לייזום הרש"ק ולגרום לפיצוץ חיצוני, והנזק לקיר הבטון עשוי להיות בעל אופי מקומי ומוגבל. במקרים של פגיעה ישירה במעטפות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים מהסוגים הנדונים יתכנו בהחלט מצבים של חדירת רש"קים שונים דרכן, אף אם לא מדובר ברש"קים הכוללים מרעום השתייה המיועדים לחדירה עמוקה במטרות קשות (חודרי ביצורים), וזאת בעיקר בפגיעה במעטפת רכה של קיר בני או של גג קל. הדבר יכול לגרום להשפעות פיצוץ מוגברות הנובעות מהפיצוץ בחלל הסגור, במלואו או בחלקו, בהשוואה לפיצוץ באוויר חופשי. במקרים של פגיעה ישירה בבניין אזרחי בלתי מוגן יש להתחשב גם באפקט הנגיפה של גוף הרש"ק על הרכיבים הנפגעים, אשר נגרם כתוצאה ממסת הרש"ק וממהירותו הגבוהה, גם אם הרש"ק אינו מכיל חומר נפץ או שחומר הנפץ אינו מיוזם. כאשר הפיצוץ מתרחש תוך כדי מעבר הרש"ק דרך המעטפת הנחדרת של הבניין, השפעת הפיצוץ על המעטפת עלולה להיות חמורה במיוחד. פגיעה ישירה של רש"ק על קיר מעטפת עלולה להיות רק בחלק מהמעטפת הפונה לכיוון הירי ואילו קירות בחזית המנוגדת לא ייחשפו לפגיעה ישירה. רש"ק עלול לפגוע גם בגג הבניין. ניתן להבדיל בין פגיעה של רש"ק תלול מסלול כמו מרגמה לבין רש"ק שטוח מסלול כמו פגז ארטילריה. השפעת רש"ק תלול מסלול חמורה יותר לחדירה דרך גג המבנה בהשוואה לפגיעתו בקיר המבנה, גם אם הוא זהה בנתוניו, ואילו סכנת החדירה של רש"ק שטוח מסלול חמורה יותר בקיר המבנה. הדבר נובע מזווית הפגיעה של הרש"ק ביחס למישור הרכיב הנפגע ומיכולתו לחדור דרך הרכיב. מצד שני, השפעת הרש"ק במקרה של פיצוץ מגע מיד בפוגעו במעטפת, עלולה להיות חמורה יותר על קיר מעטפת במקרה של רש"ק תלול מסלול מאותם נימוקים. כאשר הפגיעה הישירה מתרחשת במעטפת של בניין הבנוי בשיטת "בנייה קלה", או במבנה הכולל גג קל העשוי למשל ממסבכי עץ מחופים ברעפים, התנגדות המערכת המבנית קטנה הרבה יותר מזו של מערכות מבניות של בניינים קונוונציונליים קשיחים. בנוסף לכך, במקרים אלה נתונים אחרים, כמו שלמותה המבנית ורציפותה גם הם נחותים במידה ניכרת בהשוואה לתקרה מקשית למשל של בניין מגורים קונוונציונלי הכולל שלד מבטון מזויין, וכתוצאה מכך צפוי נזק חמור למעטפת ולחלק מהבניין, אם לא כל הבניין. הכרת והבנת תופעות אלה יכולות להוות בסיס לתכן מושכל יותר של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים. הדבר יכול לבוא לידי ביטוי בהתאמת הדרישות ביחס למידת העמידות המיגונית הנדרשת/הרצויה של החלקים השונים של מעטפת הבניין למידת הסיכון להתרחשות פגיעה ישירה של הרש"קים הנדונים בחלקים השונים של המעטפות החיצוניות של בניינים אזרחיים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים.

השפעות הרס על רכיבי מעטפות ומערכות מבניות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים המתלוות לפיצוצים על קרקעיים של רש"קים מהסוגים המוזכרים לעיל, המתרחשים במקרה של פגיעה ישירה של רש"קים אלה בבניין, צפויות להיות פחות חמורות בהשוואה להשפעת האחרות (הדף,

נגיפה, חדירה) של הפגיעה הישירה. למרות זאת, הן לא בהכרח זניחות (למשל פגיעה אפשרית חמורה של רסיסים בעמודי בטון מזוין בדלים בקומות עמודים פתוחות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים). מידת החומרה של השפעת הרס בעת פגיעה ישירה של רש"ק כלשהו בבניין אזרחי בלתי מוגן רגיל, כדוגמת בניין מגורים, תלויה כמובן בנתוני הרש"ק הפוגע ובמאפיינים המבניים והחומריים של המעטפת ושל המערכת המבנית של הבניין הנפגע. בהקשר זה יש לציין שבמקרה של חדירת רש"קים מהסוגים הנדונים בטרם התפוצצותם דרך מעטפת של בניין אזרחי בלתי מוגן הכולל רכיבים מבניים רגישים לרסס, כגון עמודים בדלים ו/או קורות מבטון מזוין בעלי מידות חתך מוגבלות, ועוד יותר קורות מבטון דרוך או טבלות חלולות דרוכות, עלולים הרסיסים הנוצרים כתוצאה מהפיצוץ לגרום לחיתוך מוטות הזיון או של גדילי דריכה הממוקמים בקרבת השפה של רכיבים מבניים אלה ולסכן בכך את יכולתם לשאת את עומסי הכבידה הפועלים עליהם. בנוסף לכל אלה יש לזכור שרסס מהווה את אחד האיומים החמורים ביותר העלולים לגרום לפגיעות חמורות באנשים, במיוחד באנשים השוהים מחוץ לבניינים, אך גם אנשים השוהים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים שמעטפותיהם חדירות לרסיסים (לדוגמה מעטפות בנייני מגורים הבנויים בשיטות בנייה קלות, בניינים הכוללים קירות חיצוניים מבלוקי בני וכו'), ולא במרחבים מוגנים. סיכון זה גדול במיוחד במקרים של התרחשות פיצוץ בחלל פנימי של בניין כזה.

כאמור, חומרת הנזק שעלול להיגרם לבניין אזרחי בלתי מוגן, במקרה של פגיעה ישירה בו, תלויה, בנוסף לנתוני הרש"ק הפוגע, גם בנתוני מעטפת הבניין ונתוניו המבניים העיקריים. נתונים אלה מתייחסים לחומרים מהם נבנה הבניין הנפגע (בטון מזוין, בטון דרוך, קירות בני, פלדה וכו'), לנתוני הגיאומטריים העיקריים (מידות כלליות של הבניין – אורך, רוחב, גובה, מספר הקומות, מפתחי הגישור של רכיבי כפיפה – (קורות, תקרות, רצפות), גובה העמודים וכו'), לסכמות המבניות של רכיבי המעטפת ושל שלד הבניין, לפרטי החיבור בין רכיבי מעטפת הבניין ורכיבי השלד שלו, לשיטת הביצוע (קונוונציונלי, מתועש, טרום) וכו'. מכלול מאפיינים אלה עלול להשפיע מאוד על היקף הנזק שעלול להיגרם לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, לרבות לבנייני מגורים, כתוצאה מפגיעה ישירה של רש"ק נתון כלשהו בהם. היבט חמור במיוחד של הנזק קשור לסכנה של התפתחות אפשרית של תהליכי התמוטטות בשרשרת, כמפורט בסעיף 4.7 להלן. בצילומים שבאיורים 4.15 - 4.1 להלן מוצגות מספר דוגמאות של התוצאות האפשריות של פגיעה ישירה בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים באמצעות רש"קים שונים העלולים להוות איום על בניינים אזרחיים בלתי מוגנים באזורים שונים ברחבי ישראל, כמפורט בפרק 2 לעיל (פגזי ארטילריה, רקטות, פצצות אוויר או טילים מסוגים שונים). דוגמאות אלה מובאות ממקורות מידע בלתי מסווגים שונים, כגון התקשורת המקומית והעולמית ו/או האינטרנט ו/או כנסים שונים וכו'. הם מציגים פגיעות שאירעו בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים מהסוגים הנפוצים בישראל, עם דגש על בנייני מגורים, במהלך עימותים מלחמתיים שהתרחשו בשנים האחרונות (לדוגמה במהלך מלחמת המפרץ הראשונה, מלחמת לבנון השנייה, מבצע "עופרת יצוקה" וכו'). ניתן להתרשם באופן כללי, שהיקף הנזק וההרס שעלול להיגרם לבניינים מהסוג הנדון כתוצאה מפגיעה מלחמתית ישירה בהם תלוי, בנוסף לנתוני הרש"ק הפוגע, גם במיקום הפגיעה בבניין ובנתונים המבניים של הבניין הנפגע, כמוזכר לעיל.

לאור מכלול הנתונים המפורטים לעיל ניתן להעריך שפגיעה ישירה של רש"קים הנושאים כמויות מוגבלות של חומרי נפץ בשיעור של מספר קילוגרמים של חנ"מ, כדוגמת פגזי ארטילריה קלה, פצצות מרגמה או רקטות לטווח קצר או בינוני – כגון "קטיושה", "קסאם" וכו', צפויה לגרום במרבית המקרים לנזק מבני מקומי מוגבל בלבד לבניינים אזרחיים שלודים בלתי מוגנים רגילים הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות מהסוגים הנפוצים בישראל, כמוצג בצילומים שבאיורים 4.1-4.5 להלן. יחד עם זאת יש מקום לחזור ולהדגיש שחומרת הנזק הצפוי להיגרם לרכיבים המבניים השונים כתוצאה מפגיעה ישירה בהם ע"י הרש"קים הנדונים, תלויה לא רק בנתוני הרש"ק הפוגע, אלא גם בנתוני הבניין/הרכיב המבני הנפגע. כך למשל הנזק הנגרם לגגות העשויים טבלות בטון מזויין מקשיות, במיוחד במקרה שהן טבלות מקשיות מצולבות הנשענות על גבי מערכת קורות בטון מזויין, כתוצאה מפגיעה ישירה של רש"קים מהסוג הנדון, צפוי להיות פחות חמור מאשר הנזק הנגרם לגגות עשויים מתקרות צלעות, תקרות ערוגות או טבלות חלולות טרומות דרוכות. ניתן להתרשם מכך תוך השוואה של הנזקים המוצגים בצילומים שבאיורים 4.1-4.3 עם אלה שבאיור 4.4. קוטרו של אזור ההרס הנפרץ של קיר בטון מזויין בעובי מוגבל כמקובל בבנייה אזרחית רגילה, כמפורט בפרק 3 לעיל, או בגג/תקרת בטון מזויין מקשית, כתוצאה מפגיעה ישירה בהם ע"י רש"קים קלים מהסוג המוזכר לעיל הינו בדרך כלל מספר עשרות סנטימטרים ולרוב לא יותר מ- 1.0-1.5 מ'. מעבר לאזור הנפרץ, ניזוקים ברמת חומרה זו או אחרת האזורים הסמוכים לאזור הפריצה של הרכיב המבני הנפגע. כך לדוגמה בצילום שבאיור 4.4 ניתן לאבחן בבירור שבנוסף להרס המקומי/פריצה של הגג באזור הפגיעה והחדירה של הרש"ק הפוגע, ניזוק קשה הגג הנדון, הבנוי מרכיבים טרומים של טבלות חלולות דרוכות, בשטח נרחב יחסית סביב אזור הפגיעה, כתוצאה מניתוק והתקלפות שכבת הבטון התחתונה של הטבלות החלולות הדרוכות, הכוללת את גדילי הדריכה של טבלות אלה.

בנוסף לנזקים הנגרמים לרכיבי שלד של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, הנפגעים ישירות על ידי הרש"קים הנדונים, צפויים להינזק בדרגות חומרה שונות גם רכיבי שלד ורכיבי בניין אחרים (בעיקר קירות בני, חלונות, דלתות, מערכות חשמל, תברואה, מיזוג אוויר וכו') הסמוכים לאזור הפגיעה. כפי שצוין לעיל נזקים אלה צפויים להיות חמורים יותר, כאשר הרש"ק הפוגע חודר את המעטפת החיצונית של הבניין בטרם התפוצצותו והפיצוץ של הרש"ק הפוגע מתרחש בחלל פנימי של הבניין. ניתן להתרשם מחומרת פגיעה כזו מצילום המוצג באיור 4.5, המתאר פנים של חלל בניין מגורים לאחר פגיעה ישירה של רקטת 122 מ"מ במעטפת חיצונית של הבניין וחדירת הרש"ק לחלל הפנימי של הבניין בטרם התפוצצותו. במצב זה גדל מאוד גם הסיכון להיפגעות אנשים השוהים בבניין הבלתי מוגן (למעט אלה השוהים במרחבים מוגנים הקיימים בחלק מהבניינים הקיימים בישראל, כפי שפורט בפרק 3 לעיל), באזורים הסמוכים לאזור הפגיעה, כתוצאה מלחצי הדף אוויר ובמיוחד כתוצאה מפגיעה אפשרית של רסיסי מתכת המועפים ממעטפת הרש"ק המתפוצץ, או כתוצאה מפגיעת רסיסי זכוכית הנוצרים עקב התנפצות חלונות ורכיבים מזוגגים אחרים בעת פיצוץ הרש"ק, או כתוצאה של היפגעות מחלקים ניתקים של רכיבי בניין, מערכות בניין ו/או תכולת הבניין (ריהוט, ציוד וכו'), או מרגמות כמצוין לעיל.

בהקשר לאפשרות של פגיעה ישירה של רש"קים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים הבנויים בשיטות בנייה טרומות יש לציין שכאשר פיצוץ הרש"ק מתרחש לאחר חדירת הרש"ק לחלל פנימי של הבניין, גדל מאוד הסיכון להיווצרות נזק חמור לשלד הבניין. בתנאים מסוימים עלולים אף להתפתח תהליכי התמוטטות בשרשרת, במיוחד בבנייני קומות שלא תוכנו לכך מראש ולא ננקטו אמצעים לצמצום הסכנה להתמוטטות בשרשרת בהם במקרה של כשל מקומי של רכיבי/י שלד מסוים/ים. דוגמא לנזק חמור/כשל של מבנה טרום כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 122 אשר חדרה למבנה והתפוצצה בתוכו מוצגת בצילומים שבאיורים 4.6-4.7. במקרה הנדון אומנם לא התרחשה התמוטטות בשרשרת של הבניין, בעיקר משום שהמבנה הנדון היה מבנה חד קומתי ומכיוון שהרש"ק הפוגע המוזכר לעיל נשא כמות חומר הנפץ מוגבלת למדי. יחד עם זאת, אופי הנזקים והכשלים המבניים שאובחנו בו לאחר הפגיעה, במיוחד כשל של חלק ממחברי הפלדה בין הרכיבים הטרומים השונים צריכים להדליק "נורה אדומה" בכל הקשור למידת הסיכון להיפגעות חמורה של בנייני קומות טרומים הבנויים בשיטות בנייה דומות, במקרה של פגיעה מלחמתית בהם. כך למשל ניתן להניח שקיימת סבירות גבוהה לכך שאילו הפגיעה בבניין הנדון הייתה של רש"ק כבד יותר הנושא כמות חומר נפץ גדולה מזו של הרש"ק שפגע בפועל בבניין הנדון, לדוגמא פגיעה של רקטה בקוטר 220 מ"מ, הבניין הנדון היה מתמוטט כליל.

בצילום שבאיור 4.8 ניתן לאבחן נזק מקומי חמור שנגרם לעמוד מבטון מזוין בקומת הקרקע של בניין מגורים בן מספר קומות, שנבנה בשיטת בנייה קונוונציונלית, כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת "קסאם" בעמוד זה. למרות הנזק החמור שנגרם לעמוד הנדון, שניתן להגדירו כהרס של העמוד, הבניין בכללותו שמר על יציבותו. לא התפתחו בבניין תהליכים של התמוטטות בשרשרת ולא נגרמו נזקים משמעותיים בחלקיו האחרים. ניתן להסביר זאת על בסיס נתוני הבניין הנדון שנבנה בשיטת בנייה קונוונציונלית המבטיחה קשר מונוליתי בין הרכיבים השונים של שלד הבניין, ובתרומה המשמעותית של קירות הבני בקומות הבניין שמעל העמוד הנפגע, אשר באה לידי ביטוי ביכולתם להעביר, תוך שיתוף פעולה עם רכיבי הבטון המזויין של שלד הבניין (תקרות, קורות, עמודים) בקומות שמעל אזור הפגיעה (אשר לא נפגעו) את עומסי הכבידה של הקומות העליונות של הבניין ולסייע לרדיסטרביציה של העומסים שפעלו במקור על העמוד שנפגע, אל עמודים אחרים הסמוכים אליו. בהקשר זה נזכיר ניתן לאזכר כי במחקר ניסויי שנערך במכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון [53] הוחל בבחינת יכולתם של קירות הבני לצמצם את הסכנה להתפתחות תהליכי התמוטטות בשרשרת. התייחסות נוספת, מפורטת יותר, לנושא זה מוצגת בסעיף 4.7 להלן.



איור 4.1: פריצה והרס מקומי של קיר מעטפת בבניין מגורים טרום כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 122 מ"מ מזויין טרומים, כתוצאה של פגיעה ישירה של רקטת 122 מ"מ



איור 4.2: פריצה והרס מקומי של רצפת ביניים בבניין מגורים טרום כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 122 מ"מ במעטפת חיצונית של הבניין אשר נחדרה על ידי הרש"ק בטרם התפוצצותו



איור 4.3: פריצה והרס מקומי של גג מבטון מזויין של בניין מגורים כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 122 מ"מ



איור 4.4: פריצה והרס מקומי נרחב של גג בניין מלוחות בטון חלולים טרומים דרוכים כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת "קטיושה"



איור 4.5: נזק נרחב לרכיבי בניין ולתכולתו. בחלל פנימי של בניין מגורים, כתוצאה מפיצוץ פנימי של רקטת 122 מ"מ לאחר שחדר דרך גג הבניין



איור 4.6: נזק כבד/הרס של קטע בניין מגורים חד קומתי טרום כתוצאה מפיצוץ פנימי של רקטה בקוטר 122 מ"מ לאחר פגיעה ישירה וחדירתו לבניין



איור 4.7 : הרס מקומי של מחברי פלדה בין ספיני קירות טרומים של בניין המגורים המוצג באיור 4.6, כתוצאה מפיצוץ פנימי של רקטה בקוטר 122 מ"מ



איור 4.8 : הרס מקומי של עמוד בקומת קרקע פתוחה של בניין מגורים קונוונציונלי מבטון מזויין כתוצאה של פגיעה ישירה של רקטת "קסאם"

תשומת לב מיוחדת ראוי לתת למקרה של פגיעה ישירה של רש"קים מהסוג הנדון בבניינים אזרחיים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים הבנויים בשיטות בנייה המכוננות בדרך כלל כ"בנייה קלה". בניינים מסוג זה הינם לרוב בנייני מגורים קטנים יחסית, בני קומה אחת או שתיים. ניתן

למצוא אותם בעיקר באזורים כפריים ובעיירות פיתוח והרבה פחות בריכוזי אוכלוסייה גדולים. בכל אופן, הם אינם מהווים כיום אחוז משמעותי ממכלול בנייני המגורים הקיימים בישראל, כמצוין בפרק 3 לעיל. יחד עם זאת יש לציין שהם נפוצים למדי באזורים הסמוכים לקווי עימות, כדוגמת אזורים בצפון הארץ הקרובים לגבול לבנון, או אזורים בדרום הארץ בקרבת רצועת עזה. בניינים מסוג זה מאופיינים על ידי גגות קלים העשויים לרוב מקונסטרוקציית עץ או פלדה דמוית מסבכים, המקורים על ידי רעפי חרס או בטון, או בקירוי דק וקל אחר, כגון פנלים מפח מבודד, וכו'. גם קירות המעטפת החיצונית והמחיצות הפנימיות של בניינים מסוג זה עשויים לעתים קרובות מקונסטרוקציית קלה מעץ או מפלדה המחופה משני צידיה בחיפויים דקים שונים (לוחות גבס, לוחות מסוג "צמנטבורד" וכו') וביניהם מקובעים חומרי בידוד תרמי, כמוזכר בפרק 3 לעיל. לכן בבניינים מסוג זה קיים סיכון מוגבר לנזק חמור כתוצאה מפגיעה בהם על ידי רש"קים מהסוג המוזכר לעיל, בהשוואה לבניינים דומים אחרים הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות. יש לתת את הדעת לעובדה זאת בכל תהליך של קבלת החלטות ביחס לשיפור העמידות המיגונית של בניינים אזרחיים רגילים בכלל ושל בנייני מגורים בפרט. בבניינים מסוג זה לא רק שגג הבניין הינו בעייתי מהיבט זה, אלא לעתים קרובות גם קירות הבניין, הן קירות המעטפת החיצונית והן הקירות הפנימיים/המחיצות. המעטפות של בניינים אלה אינן מסוגלות ברוב המקרים למנוע את חדירת הרש"ק הפוגע אל תוך החלל הפנימי של הבניין הנפגע בטרם התפוצצותו. אם הפיצוץ מתרחש בחלל פנימי של בניין מסוג זה, גם אם מדובר בפיצוץ של כמות קטנה יחסית של חומרי נפץ הנישאים על ידי הרש"קים המוזכרים לעיל, עלול הדבר לגרום לנזק כבד מאוד המקרים ובמקרים רבים אף להרס כולל של הבניין. באיור 4.9 להלן מוצגת לדוגמא פגיעה ישירה של רקטת "קסאם" בגג רעפים של בית מגורים מסוג זה. ניתן להתרשם מהיקף הנרחב בהרבה של הנזק ומההרס שנגרמו לגג הבניין במקרה זה, בהשוואה לנזקים שנגרמו לגגות העשויים מבטון מזויין בבניינים המוצגים באיורים 4.2-4.3, זאת למרות העובדה שבניינים המוצגים באיורים אלה נפגעו על ידי רש"קים כבדים יותר הכוללים כמות גדולה יותר של חומר נפץ מאשר זאת המצויה ברקטת "קסאם".

באיור 4.10 להלן מוצגת לדוגמא תוצאה של פגיעה ישירה של רקטה בקוטר 122 מ"מ בגג רעפים של בניין מגורים מהסוג הנדון. יש לציין שרקטות מסוג זה, אמנם שייכות לקבוצת הרקטות הנושאות כמות חומר נפץ מוגבלת של מספר קילוגרמים, אולם הן כבדות יותר מרקטות "קסאם" המוזכרות לעיל וכמות חומר הנפץ בהן גדולה יותר, אם כי עדיין מוגבלת לקילוגרמים ספורים. כמו כן, טווח הפגיעה שלהן הינו גדול יותר מזה של רקטות "קסאם" המוזכרות לעיל (מספר מוגבל של עשרות קילומטרים, בהשוואה לקילומטרים ספורים). בכך הן מסכנות כמות גדולה יותר של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים הממוקמים באזורים הסמוכים לקווי העימות השונים המוזכרים לעיל. פגיעה ישירה של הרש"ק הנדון בבניין מגורים זה גרמה להרס נרחב ולהתמוטטות כוללת של חלק גדול של הבניין. לאור הניסיון שנצבר בישראל מאירועים של פגיעות רש"קים מהסוגים הנדונים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים, עם דגש על בנייני מגורים, ניתן לקבוע שחומרת הנזק והיקף ההרס הצפוי במקרה של פגיעה ישירה של רש"קים מהסוג הנדון בבניינים אזרחיים רגילים הבנויים בשיטות "בנייה קלה" על סוגיה השונים, הינם לרוב חמורים במידה משמעותית מאלה החזויים במקרה של פגיעות כאלה בבניינים אזרחיים בלתי

מוגנים הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות או טרומות, הכוללות מעטפת קשיחה, כמתואר לעיל (ראו גם איורים 4.1-4.8).



איור 4.9: פריצה והרס נרחב של גג רעפים בבניין מגורים הכולל קונסטרוקציית עץ ותקרה תותבת תחתונה (תקרת "רביץ") כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת "קסאם"



איור 4.10: הרס כללי של חלק מבניין מגורים שנבנה בשיטת "בנייה קלה" כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 122 מ"מ בגג הבניין

ברור שככל שהרש"ק הפוגע ישירות בבניין אזרחי בלתי מוגן הינו כבד יותר ונושא כמות חומר נפץ גדולה יותר חומרת הנזקים הצפויים להיגרם לבניין הנפגע והיקפם הינם חמורים יותר. הדבר נכון באופן עקרוני עבור כל סוגי הבנייה האזרחית הבלתי מוגנת המקובלת בישראל,

כמפורט בפרק 3 לעיל. באיורים 4.11-4.14 להלן מוצגות מספר דוגמאות של פגיעה ישירה בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים ע"י רקטות כבדות יותר מאלה שפגעו בבניינים המוצגים באיורים 4.1-4.8 לעיל.



איור 4.11: פריצה והרס מקומי של רצפת מקשית מבטון מזוין של מרפסת גג בבניין מגורים מדורג כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 220 מ"מ



איור 4.12: נזק נרחב שנגרם לבניין מגורים מדורג הבנוי בשיטות בנייה קונוונציונליות כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 220 מ"מ במרפסת גג הבניין



איור 4.13: התמוטטות חלקית של בבניין מגורים בן 4 קומות הבנוי בשיטת בנייה קונוונציונלית כתוצאה מפגיעה ישירה של רקטת 220 מ"מ



איור 4.14: נזק/הרס בכפיפה אם כי ללא התמוטטות של תקרת ביניים בבניין מגורים המוצג באיור 4.13, אשר נפגע בפגיעה ישירה של רקטת 220 מ"מ

הפגיעות המוצגות באיורים 4.11-4.14 מתייחסות לפגיעות ישירות של רקטת 220 מ"מ לטווח בינוני בבנייני מגורים, לרבות בבניין מגורים מדורג, באזור המטרופולין של חיפה במהלך מלחמת לבנון השנייה. בניינים אלה בנויים בשיטת בנייה קונוונציונלית, וכוללים שלד בטון מזויין עם קירות ומחיצות בני. כפי שצוין לעיל בבנייני מגורים מדורגים מהסוג המוצג באיורים 4.11-4.12 אופייניים לאזורים ההרריים שונים בישראל (חיפה, ירושלים וכו'). במקרה המוצג

באיורים הנ"ל הרש"ק הנדון פגע ברצפת אחת ממרפסות הגג הפתוחות של הבניין, חדר דרכה ואף דרך רצפת בינים נוספת של הבניין, טרם התפוצצותו. כתוצאה מכך, נגרמו נזקים מבניים חמורים לרכיבי שלד הבניין ולרכיביו המשלימים, כפי שניתן להתרשם מעיון באיורים 4.11-4.12, כמו גם לתכולתו. יחד עם זאת יש לציין שבמקרה הנדון לא התפתחו תהליכים של התמוטטות בשרשרת של הבניין הנפגע. מן הראוי לציין שבניין זה הינו חדש יחסית. הוא נבנה בשנים שכבר היו קיים בישראל תקן האמור להבטיח עמידות סיסמית של בניינים. כמו כן, על פי דיווחי תקשורת שתיארו אירוע זה, כולל הבניין הנדון גם מרחבים מוגנים דירתיים, על פי דרישות של תקנות ההתגוננות האזרחית שפורסמו בשנת 1992 [4]. כל אלה יכולים להגדיל את שרידותם של בניינים מסוג זה גם במקרה של פגיעה מלחמתית או טרוריסטית בהם ובמיוחד לצמצם את הסכנה להתפתחות תהליכי התמוטטות שרשרת בהם. תנאי לכך הוא כמובן שהתכן והביצוע שלהם אכן עונה לדרישות התקנים והתקנות המוזכרות לעיל. למרבה המזל דיירי הבניין ששמעו את צפירת האזעקה, הספיקו להיכנס למרחבים המוגנים הקיימים בבניין זה ולהינצל בכך מכל פגיעה פיזית. הפגיעה המוצגת בצילומים שבאיורים 4.13-4.14 הינה פגיעה ישירה של רקטת 220 מ"מ לטווח בינוני בבניין מגורים בן 4 קומות באזור המטרופולין של חיפה במהלך מלחמת לבנון השנייה. בניין זה כולל 3 קומות מגורים מעל קומת עמודים פתוחה. כפי שניתן לראות בצילומים שבאיור 4.13 הבניין הנדון ניזוק קשה מאוד מפגיעה זו וחלקו אף התמוטט. למרות התמוטטות של חלק מרצפות/תקרות הבניין, שנגרמה כתוצאה של הרס כללי של חלק מעמודיו, כפי שניתן לראות בצילומים שבאיור 4.13, כמו גם הרס כללי של קירות הבני והמחיצות באזור הפגיעה, תהליכי התמוטטות בשרשרת של הבניין הוגבלו לאזור מצומצם יחסית באגף הנפגע ולא התפשטו לכל הבניין. גם במקרה זה ההסבר האיכותי לאי התפתחות של תהליכי התמוטטות כללית בשרשרת נעוץ בעובדה שמדובר בבניין שלוד מבטון מזויין יצוק באתר הבנוי בשיטת בנייה קונוונציונלית, הכולל ספיני קירות/מחיצות בני רבים. אותם קירות ומחיצות בני אשר לא נהרסו כתוצאה מהפגיעה הישירה של הרש"ק הנדון בבניין זה, גם אם הם ניזוקו ברמה זו או אחרת, תרמו תרומה משמעותית לעצירת תהליכי התמוטטות כללית בשרשרת של הבניין הנדון, כפי צוין לעיל ביחס לבניין המוצג באיור 4.8 ובבניין המוצג באיורים 4.11-4.12. כמובן שנדרשת זהירות רבה בפרשנות של תוצאות פגיעה כזו. משלוש דוגמאות אלה לא ניתן להסיק מסקנה כללית שבשום מקרה לא צפויה התפתחות תהליכי התמוטטות בשרשרת של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות, כתוצאה מפגיעה ישירה בהם של רש"קים מהסוג הנדון. גורמים רבים עלולים להשפיע על כך, ביניהם סוג הרש"ק הפוגע, מיקום הפגיעה, איכות התכן והביצוע של רכיבי שלד הבניין, פרטי החיבור בין הרכיבים המבניים השונים של שלד הבניין, סוגי הרצפות/התקרות בבניין, כמות הקירות ומחיצות הבני שאינם מתמוטטים כתוצאה של הפגיעה, מצב התחזוקה של הבניין וכו'. בהקשרים אלה ניתן לציין למשל שהפגיעה הישירה של רש"ק בעמוד יחיד בקומת קרקע פתוחה של בניין מגורים המוצג באיור 4.6 לעיל הייתה של רקטת "קסאם" קלה הנושאת כמות קטנה של חומר נפץ, זאת בניגוד לרקטת 220 מ"מ, שפגעה בבניין המוצג באיורים 4.13-4.14, שהיא כבדה בהרבה ובעלת מהירות פגיעה גבוהה יותר. כמו כן, היא כוללת כמות חומר נפץ רבה במידה ניכרת מזו של רקטת "קסאם". מן הראוי להדגיש שבידי מדינות וארגוני טרור הפועלים מעבר לגבולות המדינה יש גם רקטות לטווח בינוני כבדות והרסניות עוד יותר, כדוגמת רקטות בקוטר 302 מ"מ, אשר אף הן הופעלו נגד מטרות אזרחיות באזור הצפון, במיוחד כנגד אזור

המטרופולין של חיפה. למרבה המזל במלחמה זו לא אירעו פגיעות ישירות של רקטות אלה בבניינים אזרחיים רגילים, כגון בנייני מגורים. כמובן שאין כל ביטחון שפגיעות כאלה, ואף פגיעות של רש"קים כבדים עוד יותר לא יתרחשו במקרה של עימות מלחמתי עתידי. בהקשר זה ניתן לקבוע באופן איכותי לכל הפחות, שפגיעה ישירה של רקטה בקוטר 302 מ"מ המוזכרת לעיל, במקום רקטה בקוטר 220 מ"מ, כפי שפגעה בפועל בבניין מגורים המוצג באיורים 4.13-4.14, היתה גורמת להרס נרחב בהרבה של הבניין הנדון. פירוט יתר ביחס לנושאים הקשורים לסכנה להתמוטטות בשרשרת של בנייני קומות, עם דגש על בנייני מגורים, כתוצאה מפגיעה מלחמתית או טרוריסטית בהם, מוצג בסעיף 4.7 להלן.

לעומת פגיעה ישירה של רש"קים מהסוג המוזכר לעיל, פגיעה ישירה של רש"קים הנושאים כמויות חומר נפץ גדולות של מאות קילוגרמים, כדוגמת פצצות אוויר או טילים ארוכי טווח מסוגים שונים, כדוגמת טילים בליסטיים מסוג "סקאד" על סוגיו השונים וטילים בליסטיים חדישים יותר המיוצרים על ידי איראן, בעלי טווחים של אלפי קילומטרים, המוזכרים בפרק 2 לעיל, בבניינים אזרחיים רגילים הנפוצים בישראל, עלולה לגרום לנזק חמור מאוד לבניינים הנפגעים ואף להתמוטטותם המקומית או הכוללת, כמוצג בצילום שבאיור 4.15. בהקשר זה יש להדגיש שהיפגעות הרסנית דומה עלולה להתרחש לא רק במקרה של פגיעה ישירה של רש"קים מהסוג הנדון בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים, אלא גם במבנים מוגנים שלא תוכנו מראש לפגיעה ישירה בהם על ידי רש"קים מהסוג הנ"ל. כמו כן, בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים מהסוג הנדון עלולים להתמוטט כליל לא רק במקרה של פגיעה ישירה בהם על ידי רש"קים מהסוגים הנדונים, אלא בתנאים מסוימים גם במקרה של פגיעה קרובה מאוד שלהם לבניינים כאלה, כמפורט בסעיף 4.3 להלן.



איור 4.15: הרס כללי של בניין מגורים כתוצאה של פגיעת טיל "סקאד"

4.3 תגובת בניינים אזרחיים רגילים לפגיעה קרובה של רש"קים

שונים

פיצוץ של רש"ק נתון בקרבת בניין אזרחי בלתי מוגן כלשהו, כדוגמת בניין מגורים, צפוי לגרום להינזקות הבניין במידה מסויימת. חומרת הנזק שעלול להיגרם לבניין כזה תלויה כמובן בסוג הרש"ק ובמאפייניו העיקריים, כגון סוג וכמות חומר הנפץ ברש"ק, וכן במרחק שבין מוקד הפיצוץ לבניין הנפגע. בנוסף לכך, תגובת הבניין לפגיעה קרובה של רש"ק נתון וחומרת הנזק הצפוי להיגרם לו כתוצאה מפגיעה זו תלויים גם בסוג המעטפת של הבניין הנפגע ובסוג המערכת המבנית שלו, ובמאפיינים החומריים והמבניים של מעטפתו ושל רכיביו המבניים העיקריים. נתונים עקרוניים בקשר לסוגים ומאפיינים עיקריים של מעטפות בניינים ושל מערכות מבניות המקובלות והנפוצות בבנייני מגורים המקובלים כיום בישראל מוצגים בפרק 3 לעיל.

במקרה של פיצוץ רש"ק נתון בקרבת בניין, האפקטים העיקריים של הפיצוץ המשפיעים על תגובת הבניין לפגיעה כזו הינם הדף אוויר ורסס. במקרים מסוימים של פגיעה קרובה מאוד של רש"ק כבד, במיוחד במקרה שהוא חודר לתווך קרקעי בסמוך ליסודות של הבניין הנפגע, עלולים להשפיע על תגובת הבניין הנדון גם אפקטי הלם קרקע ומכתוש, המוזכרים בפרק 2 לעיל.

כפי שצוין לעיל, המרחק בין מוקד הפיצוץ לבניין הנפגע, במקרה של פגיעת רש"ק כלשהו בקרבתו, משפיע מאוד על תגובת הבניין הנדון לפגיעה כזו. מרחק זה יכול להיות מרחק אפסי (פיצוץ מגע), מרחק של מספר מטרים או מרחק של מספר עשרות מטרים. ככל שמוקד הפיצוץ של רש"ק נתון כלשהו מבניין אזרחי בלתי מוגן הינו קטן יותר, חומרת הנזקים העלולים להיגרם לבניין הנפגע צפוי להיות חמור יותר. יחד עם זאת, ובעיקר כאשר מדובר בבניין גדל מידות, מאפייני הפגיעה יהיו לרוב מקומיים במקרה של פיצוץ קרוב והיקף השפעתם יגדל, אם כי עוצמתם תפחת, כאשר יגדל המרחק בין מוקד הפיצוץ לבניין הנפגע. בדומה, במקרה של פיצוץ רש"קים הנושאים כמויות חומר נפץ שונות במרחק זהה מבניין אזרחי בלתי מוגן, הנזקים שעלולים להיגרם לבניין הנפגע צפויים להיות חמורים יותר ככל שכמות חומר הנפץ ברש"ק המתפוצץ גדולה יותר.

על מנת לאפשר השוואה ראויה של תגובת בניינים ושל רכיבים מבניים שלהם לפגיעות קרובות של רש"קים שונים במרחקי פיצוץ שונים, כמו גם הצגת תוצאות של ניתוחים הנדסיים ואנליטיים שונים בהקשר זה, הנערכים באופן כמותי יחסי, מבלי צורך לציין במפורש באיזה סוג רש"ק (כמות חומר הנפץ) ועל איזה מרחק פיצוץ מדובר, מקובל להשתמש בערכים מקוננים כדלהלן:

- מרחק מקונן של מוקד הפיצוץ המוגדר ע"י נוסחה 4.1 להלן:

$$z = r / \sqrt[3]{W} \quad (4.1)$$

כאשר :

z - מרחק מקונם של מוקד הפיצוץ מפני המטרה ($\text{m/kg}^{1/3}$)

r - המרחק ממוקד הפיצוץ בניצב לפני המטרה (m)

W - כמות שוות ערך לחומר נפץ תקני – TNT של חומר הנפץ (kg)

- עובי מקונם של רכיבים מבניים כדוגמת רכיבי בטון מזויין (עמודים, תקרות, קירות, קורות) או קירות בני למיניהם (תוך הגדרה ברורה של סוג הרכיב הנדון) המוגדר ע"י נוסחה 4.2 להלן :

$$T_s = t / \sqrt[3]{W} \quad (4.2)$$

כאשר :

T_s - עובי מקונם של הרכיב המבני ($\text{m/kg}^{1/3}$)

t - עובי בפועל של הרכיב המבני בכוון פעולת עומס ההדף (m)

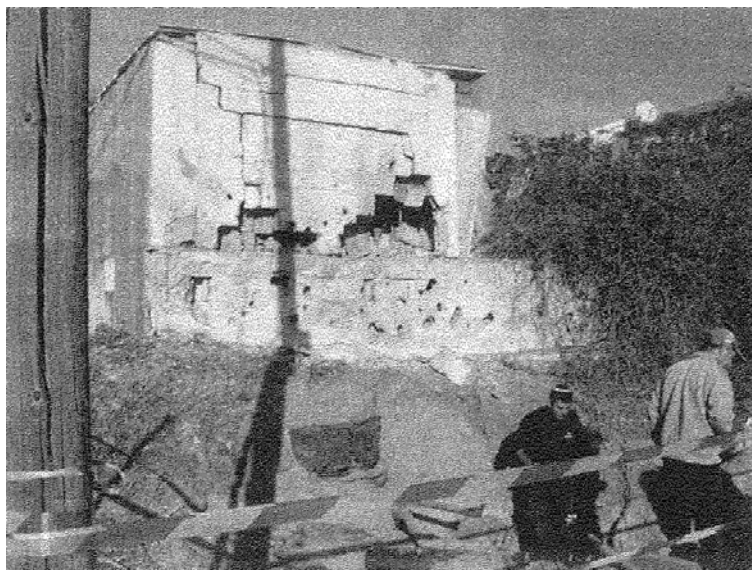
W - כמות שוות ערך לחומר נפץ תקני – TNT של חומר הנפץ (kg)

הצגת תוצאות הניתוחים השונים בתלות בעובי מקונם של רכיבים מבניים שונים כמפורט לעיל מאפשרת הן הצגה הנדסית איכותית, והן הצגה כמותית של תוצאות הניתוחים הנדונים, מבלי הצורך לפרט נתונים ספציפיים על סוג וכמות חומר הנפץ ומרחק מוקד הפיצוץ מהמטרה ויחד עם זאת להכליל את התוצאות לתחום רחב של כמויות חומר נפץ ומרחקים מתאימים המקיימים את כללי הקינום, וכן את המידע על עוביים/מידות חתך בפועל של הרכיבים המבניים אשר לגביהם מתייחסות תוצאות הניתוחים.

ניתן לקבוע באופן כללי, שככל שהמרחק המקונם של מוקד פיצוץ רש"ק כלשהו מהבניין הנפגע קטן יותר, חומרת הנזקים הצפויים להיגרם לרכיבים המבניים והלא מבניים השונים של הבניין הנדון הינם חמורים יותר. כאשר מדובר בפגיעה קרובה של רש"קים הנושאים כמות חומר נפץ מוגבלת, כדוגמת רקטות "קסאם", רקטות בקוטר 122 מ"מ וכו', אף אם מדובר על פגיעה קרובה למדי במרחק מקונם של $z \approx 0.50 \div 2.00$, השפעתה על תגובת בניינים אזרחיים בלתי מוגנים קונוונציונליים, כדוגמת בנייני מגורים רגילים הכוללים שלד בטון מזויין ומעטפת חיצונית קשיחה (קירות בני מסוגים שונים ו/או קירות בטון בעובי מוגבל) הינה לרוב מוגבלת למדי. השפעת הפיצוץ מתמקדת במקרים אלה בעיקר באזור הקרוב ביותר למוקד הפיצוץ של הרש"ק ואינה צפויה להשפיע על התגובה הכוללת של בניינים מסוג זה. פריצה מקומית של קירות בטון מזויין בעוביים מוגבלים המקובלים בבנייה אזרחית רגילה בלתי מוגנת בישראל ($T_s \approx 0.05-0.10$), או נזק חמור/הרס של עמודי בטון מזויין בעלי מידות חתך מוגבלות, כפי

שקיים בדרך כלל בבנייני מגורים בעלי מספר קומות מוגבל, עלול להתרחש במקרה של פיצוץ קרוב של רש"ק כלשהוא מהסוג הנדון במרחק מקונם קטן מאוד של $z \approx 0.25-0.50$. במקרה של פגיעה קרובה של רש"קים הנושאים כמויות חומר נפץ מוגבלות מהסוגים המוזכרים לעיל במרחק מקונם של $z \approx 0.50 \div 2.0$ צפוי נזק מקומי חמור ואף הרס מקומי של קירות בני מסוגים שונים שיש בהם שימוש בבנייני מגורים בישראל (קירות מבלוקי בטון חלולים, או מבלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלב – איטונג), אך לא נזק חמור די הצורך לרכיבי שלד הבניין מבטון מזויין, בשיעור העלול לסכן את יציבות הבניין הנפגע. במקרים אלה עיקר הנזק נגרם לאותו חלק של מעטפת הבניין הפונה למוקד הפיצוץ והנמצא בקרבתו היתרה. דוגמא לפריצה מקומית של קיר בני מבלוקי בטון חלולים כתוצאה של פגיעת רקטת 122 בקרבתו מוצגת בצילום שבאיור 4.16 להלן. הרס מקומי של קיר בני הבנוי מבלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלב (בלוקי איטונג) מוצג בצילום שבאיור 4.17. מן הראוי להדגיש שחומרת הנזק הצפוי להיגרם לקירות בני כתוצאה מפיצוץ בקרבתם תלויה, בנוסף למרחק המקונם גם בסוג הבלוקים שממנו הם בנויים, במפתח הגישור שלהם (לרוב גובה הקיר בין רצפה לתקרת המבנה), בקיום או בהעדר קירות/מחיצות פנימיים ניצבים המחוברים אל הקיר הנפגע, בקיום או בהעדר פתחים בקירות הבני הנפגעים ובאיכות הבנייה שלהם (קיום או העדר שינני קשר ו/או חגורות בטון מזויין בתחומי הקירות).

בנוסף לנזקים הנגרמים כתוצאה מהדף אוויר הנוצר עקב פיצוץ הרש"ק הפוגע, צפוי להיגרם נזק לחלק החזית של מעטפת הבניין הפונה כלפי מוקד הפיצוץ כתוצאה מפגיעת רסיסים. השפעת הרסיסים תלויה בגודל הרסיסים, צורתם ומהירות פגיעתם, ואלה תלויים בתכונות המעטפת של הרש"ק ועובייה ובמרחק מוקד הפיצוץ מהבניין הנדון; במרחקים קצרים יחסית תהיה מהירות הרסיסים גבוהה והיא תדעך עם גדול המרחק במידה ניכרת. רסיסים הנוצרים ממעטפת עבה, כמו של פגזי ארטילריה, עלולים לחדור יותר מרסיסים העשויים מעטפת דקה של רש"קים שנועדים לשאת כמות חומר נפץ גדולה יותר. רסיסים הנוצרים כתוצאה מפיצוץ קרוב של רש"קים מהסוגים המוזכרים לעיל במרחקים מקונמים מוגבלים כמצוין לעיל אינם צפויים לחדור בדרך כלל קירות בטון מזויין בעלי עובי מוגבל יחסית ($T_s \approx 0.10$) שיש בהם שימוש בבנייה אזרחית בלתי מוגנת רגילה. לעומת זאת, רסיסים אלה עשויים לחדור בקלות דרך קירות בני למיניהם, גם אם מהירותם נמוכה יותר, למשל כאשר מוקד הפיצוץ של הרש"ק הנדון הינו גדול יחסית ($z \approx 10.0-12.00$). הדבר עלול לסכן את האנשים השוהים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים, אך לא את היציבות של הבניין הנפגע. כושר החדירה של רסיסים דרך מעטפות קשיחות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים, כדוגמת בנייני מגורים וחומרת נזקי רסס מהסוג הנדון שעלולים להיגרם למעטפות בניין אלה, תלויים לא רק בסוג ובטיב החומר ממנו בנויה מעטפת הבניין ובעוביו, אלא גם בסוגי התגמירים של המעטפות הנדונות (טיח חוץ, חיפויים קרמיים קשיחים, חיפויי אבן וכו'). לטיח תהיה תוספת התנגדות מוגבלת יחסית, אולם לחיפויי אבן קשיחים עשויה להיות תרומה משמעותית נוספת להתנגדות לחדירת רסיסים.



איור 4.16: פריצת קיר בני הבנוי מבלוקי בני חלולים וחדירת רסיסים דרכו
כתוצאה מפגיעת רקטה בקוטר 122 מ"מ בקרבתו



איור 4.17: הרס מקומי של קיר בני הבנוי מבלוקי בטון מאושפרים באוטוקלב (איטונג)
כתוצאה מפגיעה קרובה של רקטה בקוטר 122 מ"מ בקרבתו

מן הראוי לציין שהחומרה וההיקף של הנזקים שעלולים להיגרם לבניינים אזרחיים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים הבנויים בשיטות המכונות "בנייה קלה" המוזכרים לעיל, כתוצאה מפגיעות קרובות של רש"קים מהסוגים הנדונים, צפויים להיות משמעותיים וחמורים במידה רבה מאלה המתוארים לעיל. הדבר נכון אף אם המרחק המקונס בין מוקד הפיצוץ לבניין נפגע מסוג זה הינו גדול יותר מהמרחקים המקונמים המוזכרים לעיל. כמו כן, הסיכון להיפגעות אנשים השוהים בבניינים בלתי מוגנים מסוג זה כתוצאה מפגיעה קרובה של רש"קים מהסוג הנדון, בהשוואה לבניינים בלתי מוגנים קונוונציונליים הכוללים שלד בטון מזויין ומעטפת

חיצונית קשיחה כמתואר לעיל, הינו מוגבר. הדבר נכון במיוחד מבחינת הסיכון להיפגעות כתוצאה מחדירת רסיסים דרך המעטפת החיצונית הבלתי קשיחה של בניינים הבנויים בשיטות בנייה אלה.

פגיעה קרובה של רש"קים כבדים יותר מאלה המוזכרים לעיל, כדוגמת רקטות בקוטר 220 מ"מ, או 302 מ"מ וכו', בקרבת בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים קונונציונליים מהסוג המתואר לעיל, עלולה לגרום לנזקים חמורים יותר במידה מסוימת מאלה שצוינו לעיל, גם אם המרחק המקונם של מוקד הפיצוץ מהבניין הנפגע לא יהיה קטן יותר מזה שצוין לעיל, עבור רש"קים קלים יותר. הסיבה העיקרית להחמרה בנזק בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים, כדוגמת בנייני מגורים הבנויים בשיטות בנייה קונונציונליות, נובע מתחום ההשפעה הנרחב יותר של לחצי ההדף הצפויים לפעול על חזיתות של בניינים אלה, הנובע מכמות גדולה יותר במידה משמעותית של חומרי נפץ הנישאים על ידי הרש"קים הנדונים, בהשוואה לרש"קים קלים יותר המוזכרים לעיל. כאשר מדובר על פיצוץ רש"קים מהסוג הנדון בקרבה יתרה לבניינים בלתי מוגנים הבנויים בשיטות שונות של "בנייה קלה" כמפורט לעיל, במרחקים מקונמים כמצוין לעיל ($z \approx 0.50 \div 2.0$), עלול להיגרם הרס נרחב ואף התמוטטות מקומית או כללית של הבניין. כך הדבר גם במקרים בהם הפגיעה הקרובה מתרחשת בקרבת בניין בלתי שלוד, כדוגמת בנייני מגורים ישנים הכוללים קירות נושאים מלבנים או בלוקי בני שונים, שהיה בהם שימוש בעיקר בעשורים הראשונים של המאה ה-20, כמפורט בפרק 3 לעיל.

בצילומים שבאיורים 4.18-4.19 מוצגות מספר דוגמאות של הינזקות בבנייני מגורים ישנים בלתי שלודים. מתוך השוואה של הנזק בדוגמאות האלה עם הנזק שנגרם לבניינים שלודים כפי שתואר לעיל, ניתן להתרשם מהשוני המהותי בהיקף הנזקים שנגרם לבניינים האלה כתוצאה מפיצוץ אותו סוג רש"ק בקרבתם. במקרה הראשון המוצג בצילומים שבאיור 4.18, פגיעה קרובה של רקטה בקוטר 220 מ"מ במרחק מקונם של כ- $z \approx 0.50$ גרמה להתמוטטות כוללת של חלק נרחב של הבניין הנדון (בניין מגורים חד קומתי בלתי שלוד). הסיבה העיקרית להרס זה נעוצה בעובדה שהרס קיר הנושא של חזית הבניין שפנה לכיוון מוקד הפיצוץ גרם לאובדן סמך אנכי לתקרה/גג הבניין והוביל להתמוטטותו, יחד עם הינזקות קשה/התמוטטות של קירות נושאים נוספים של הבניין. עובי מקונם של קיר בני זה היה כ- $T_s \approx 0.10$. לעומת זאת, הנזקים שנגרמו לבניין המוצג באיור 4.19 הינם מוגבלים במידה משמעותית מאלה שנגרמו לבניין המוצג בצילומים שבאיור 4.18, זאת למרות העובדה שגם במקרה זה מדובר על בניין בלתי שלוד הכולל קירות נושאים מלבנים (קירות מחופים באבן) בעל עובי מקונם של כ- $T_s \approx 0.08$, הקטן מזה המוזכר לעיל. יש לכך מספר סיבות. העיקריות שבהן הן המרחק המקונם הגדול יותר של מוקד הפיצוץ מחזית הבניין, בהשוואה למקרה המוצג בצילומים שבאיור 4.18, והעובדה שתקרות הבניין, במיוחד תקרת הביניים המקשית המומשכת מבטון מזוין, הנשענת על מערכת קורות פלדה וקירות נושאים מבלוקי בני בהיקפה, איבדה רק את אחד הקירות הנושאים עליו היא נשענת לאורך קטע קצר יחסית (כ- 3.0 מ' בקירוב) ואילו שאר הקירות הנושאים תמכו אותה גם לאחר הפגיעה. בנוסף לכך, אחת מקורות הפלדה המשמשת אף היא סמך אנכי לתקרה הנדונה

איבדה סמך אנכי קיצוני שלה, כפי שניתן להיווכח מעיון בצילום 4.19. למרות כל אלה הרצפה הנדונה יכלה להמשיך לשאת את עומסי הכבדה שפעלו עליה גם לאחר הינזקות הבניין כתוצאה מפיצוץ הרש"ק הנדון בקרבתו, תוך היווצרות נזקי כפיפה. הסיבה העיקרית לכך היא ריבוי סמכים אנכיים שרובם המכריע לא ניזוק כלל או שהנזקים שנגרמו להם לא פגמו באופן ממשי ביכולתם לשאת את עומסי הכבדה שפעלו על הרצפה הנדונה.



איור 4.18: התמוטטות בניין מגורים חד קומתי בלתי שלוד כתוצאה מפגיעה קרובה של רקטה בקוטר 220 מ"מ

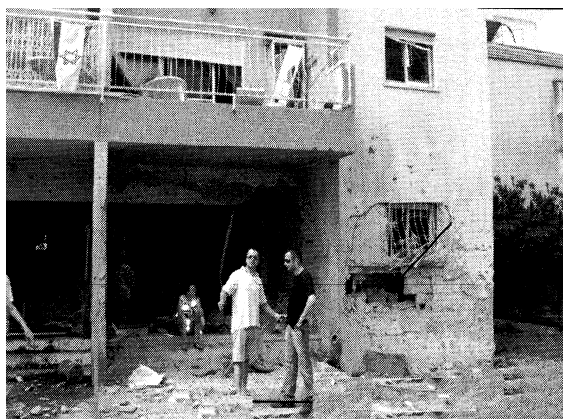
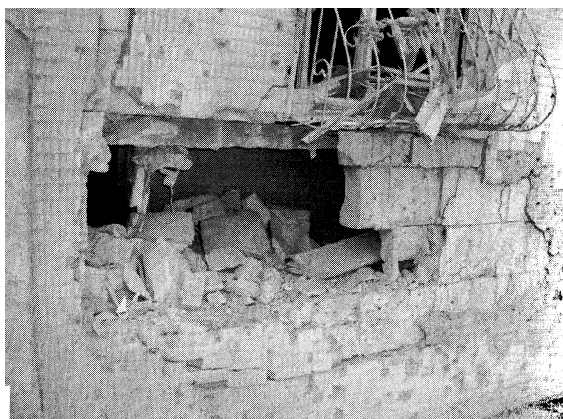
בניגוד לדוגמאות אלה, ניתן להתרשם מהצילום שבאיור 4.20 שחומרת הנזקים המבניים והיקפם, במקרה של פגיעה קרובה של רש"קים מהסוג הנדון בקרבת בניינים בלתי מוגנים רגילים הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות, הכוללים שלד בטון מזויין ומעטפת קשיחה של קירות בני, כדוגמת מרבית בנייני המגורים הקיימים בישראל, במרחקי פיצוץ מקונמים בטווחים המוזכרים לעיל, צפויים להיות מוגבלים במידה משמעותית מאלה הצפויים להיגרם לבניינים בלתי שלודים הכוללים קירות נושאים מלבנים או בלוקי בני מסוגים שונים. בהקשר זה יש לציין שהאזור הנפגע ביותר של חזית הבניין המוצג בצילומים שבאיור 4.20 לא היה ממוקם במקרה הנדון ישירות מול מוקד הפיצוץ, אלא במרחק אלכסוני מסוים ממנו. הדבר גרם להקטנת לחצי ההדף המוחזרים שפעלו על האזור הנפגע של מעטפת הבניין, הן כתוצאה הגדלה יחסית של המרחק המקונם בין מוקד הפיצוץ לאזור הנפגע של חזית הבניין והן כתוצאה של פגיעה זוויתית (לא ניצבת) של לחצי ההדף באזור הנפגע של חזית הבניין. במקרים אחרים בהם הפגיעה עלולה להתרחש במיקום אחר חמור יותר, גם אם המרחק המקונם של מוקד הפיצוץ מאזור הפגיעה יהיה זהה או דומה, כתוצאה מפגיעה ניצבת של לחצי ההדף באזור הנפגע של מעטפת הבניין, הנזקים החזויים לחזית הבניין צפויים להיות חמורים ונרחבים יותר מאלה הנראים בצילומים שבאיור 4.20. יחד עם זאת, הסיכון להתפתחות תהליכי התמוטטות בשרשרת של בניינים מסוג זה כתוצאה מפיצוץ קרוב של רש"קים מהסוג הנדון במרחקים מקונמים המוזכרים לעיל הינו קטן יותר מזה של בניינים בלתי שלודים, כדוגמת הבניין המוצג בצילומים שבאיור 4.18. התייחסות מפורטת יותר לסוגיה זו מוצגת בסעיף 4.7 להלן.



איור 4.19: הרס מקומי של קירות נושאים מלבנים מחופים באבן והינזקות רכיבי שלד בטון מזויין של בניין מגורים כתוצאה מפגיעה קרובה של רקטת 220 מ"מ

בנוסף לנושאים המוצגים לעיל, מן הראוי לציין שבמקרה של פיצוץ קרוב של רש"קים מהסוג הנדון בקרבת בניינים אזוריים רגילים בלתי מוגנים שלודים מהסוג המתואר לעיל, צפוי נזק חמור לא רק לאותם חלקי השלד והמעטפת החיצונית של הבניין הנפגע הפונים לכוון מוקד הפיצוץ והנמצאים בקרבה יתרה אליו, אלא גם לחלקים פנימיים של הבניין, כפי שניתן להתרשם מהצילום שבאיור 4.21. בצילום זה מוצג ההרס שנגרם לחלקים הפנימיים של הדירה שבקומת קרקע של הבניין המוצג באיור 4.20 שמול חזיתה אירע הפיצוץ של רקטה בקוטר 220 מ"מ. יש לשים לב במיוחד להרס נרחב של מחיצות פנימיות הבנויות מבלוקי בני, הנראה בבירור בצילום זה, עקב לחצי הדף שחדרו אל תוך הדירה הנדונה דרך דלת מזוגגת גדולה (ויטרינה מזוגגת) של חדר המגורים בדירה הנדונה שהייתה ממוקמת ישירות מול מוקד הפיצוץ של הרש"ק הנדון ואשר נהרסה כליל כתוצאה מהפיצוץ. בהקשר זה ניתן לציין שחומרת הנזק והיקפו לחלקים הפנימיים של הבניין הנפגע תלויים לא רק בסוג הרש"ק הפוגע בקרבת הבניין ובמרחק המקומם של מוקד הפיצוץ ממעטפת הבניין הנפגע, אלא גם בגודל הפתחים (פתחי חלונות, דלתות, חלקי חזית מזוגגים רגילים) במעטפת הבניין הנפגע ובנתונים הגיאומטריים והמבניים של החלקים הפנימיים של הבניין הנדון. באופן כללי ואיכותי ניתן לקבוע שככל שגודל הפתחים בחזיתות של בניינים אזוריים בלתי מוגנים רגילים הינו גדול יותר, כך גדל הסיכון להיפגעות חמורה של חלקים פנימיים של הבניין במקרה של פיצוץ רש"קים מהסוג הנדון בקרבתם.

התייחסות מפורטת יותר להשפעה של פיצוצים קרובים על רכיבי זיגוג שונים המשולבים בחזיתות של בניינים אזוריים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים מהסוגים המקובלים בישראל מוצגת בסעיף 4.6 להלן.



איור 4.20: הינזקות חזית של בניין מגורים שלוד הכולל מעטפת חיצונית של קירות בני מחופים בפסיפס קרמי, כתוצאה מפגיעה קרובה של רקטה בקוטר 220 מ"מ



איור 4.21: הרס מקומי בתוך דירה בקומת קרקע של בניין מגורים המוצג באיור 4.20, כתוצאה מפגיעה קרובה של רקטה בקוטר 220 מ"מ מחוץ לבניין

פגיעה קרובה של רש"קים כבדים כדוגמת פצצות אוויר ובמיוחד טילים בליסטיים הנושאים מאות ואף אלפי קילוגרמים של חומרי נפץ, כדוגמת טילי "סקאד" למיניהם, או טילים בליסטיים וטילי שיוט אחרים הנמצאים כבר כיום בידי מדינות עימות שונות, כגון סוריה ואיראן ואף בידי ארגוני טרור כגון חיזבאללה הפועל בלבנון, כמצוין בפרק 2 לעיל, בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים מהסוגים המתוארים לעיל, צפויה להיות הרסנית במידה ניכרת מהפגיעות הקרובות של רש"קים קלים יותר המוצגות לעיל. הדבר נכון גם במקרים שבהם המרחק המקומם של מוקד הפיצוץ של פצצות אוויר או של טילים מהסוגים הנדונים הינו זהה או דומה לזה של הרש"קים הקלים יותר המאוזכרים לעיל. הסיבה העיקרית לכך נעוצה בעובדה שכתוצאה מכמות חומר נפץ גדולה מאוד ברש"קים אלה, השפעת הפיצוץ שלהם בקרבת הבניין הנפגע הינה נרחבת יותר, קרי לחצי ההדף ההרסניים פועלים על חלקים גדולים יותר של מעטפת הבניין

הנפגע, בהשוואה לפיצוץ רש"ק קל יותר הנושא כמות חומר נפץ קטנה יותר במידה ניכרת, גם אם המרחק המקומם של מוקד הפיצוץ של שני הרש"קים הינו זהה. הדבר נכון במיוחד לגבי בנייני אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים מהסוגים המתוארים לעיל, בעלי מספר קומות מוגבל יחסית (1-6 קומות) שמידותיהם הגיאומטריות הבסיסיות (אורך, רוחב, גובה) הינם באותם סדרי גודל כמו המרחק של מוקד הפיצוץ הקרוב של הרש"קים הנדונים מחזית הבניין הנפגע, המתאים לטווח המרחקים המקומים הדומים לאלה המוזכרים לעיל ($z \approx 1.0 \div 2.0$) ואף מרחקים מקומים גדולים יותר במידת מה. במקרים אלה לא ניתן לדבר יותר על השפעה מקומית בלבד של פיצוץ קרוב של הרש"קים הנדונים על בניינים מסוג זה, אלא על השפעה כוללת חמורה היכולה במקרים רבים להיות הרסנית מאוד ולהתבטא בהרס כללי ולהוביל להתמוטטות בשרשרת של הבניינים הנפגעים. הדבר נכון במיוחד לבניינים ישנים יותר שנבנו משנות ה-50 עד שנות ה-70 של המאה ה-20 שאינם כוללים שום קירות הקשחה מבטון מזויין (כדוגמת חדרי מדרגות מחוזקים או ביטחוניים, או מרחבים מוגנים שהשימוש בהם התחיל בתחילת שנות ה-90 של המאה ה-20). בצילומים שבאיורים 4.22-4.23 מוצגים לדוגמא 2 מקרים של הינזקות קשה של בנייני מגורים קונוונציונליים הכוללים שלד בטון מזויין יצוק באתר ומעטפת חיצונית של קירות בני, כתוצאה מפגיעת טילי "סקאד" בקרבתם. למרות הנזק הכבד מאוד שנגרם לרכיבי השלד ולמעטפות של בניינים אלה לא התפתחו בהם תהליכי התמוטטות בשרשרת.



איור 4.22: הינזקות קשה של בניין מגורים קונוונציונלי שלוד עם גג מקונסטרוקציית עץ וקירוי רעפים כתוצאה מפגיעה קרובה של טיל "סקאד"

לעומת זאת, בצילום שבאיור 4.24 מוצג מקרה של התמוטטות כוללת של חלקים נרחבים של בניין מגורים קונוונציונלי שלוד כתוצאה מפגיעת טיל "סקאד" בקרבתו. ההבדלים בין חומרת הנזק שנגרם לבניין זה בהשוואה לבניינים המוצגים באיורים 4.22-4.23 יכולים לנבוע הן מהבדלים מסוימים בין מרחקי הפגיעה של הטילי ה"סקאד" מהבניינים הנדונים והן מהנתונים המבניים השונים שלהם. כמו כן, מעיון בצילום שבאיורים 4.24 ניתן להתרשם מהיכולת של חלק הבניין הכולל מעטפת חיצונית של קירות בטון מזויין לשרוד פגיעה קרובה כזאת. בכל אופן

יכולת של בנייני מגורים קונוונציונליים רגילים, הכוללים שלד מסגרותי מבטון מזויין יצוק באתר וקירות בני חיצוניים ופנימיים, לשרוד באופן סביר פגיעה קרובה של רש"קים מהסוג הנדון הינה מוגבלת מאוד.



איור 4.23: הינזקות קשה של בניין מגורים קונוונציונלי שלוד מבטון מזויין כתוצאה מפגיעה קרובה של טיל "סקאד"



איור 4.24: הרס כולל של חלקים נרחבים של בניין מגורים קונוונציונלי שלוד כתוצאה מפגיעה קרובה של טיל "סקאד"

4.4 תגובת בניינים אזרחיים רגילים לפיצוץ של מכונית תופת

מכוניות תופת מהוות את אחד מאיומי הטרור החמורים ביותר המאיימים על הסביבה הבנויה ועל האוכלוסייה המשתמשת בבניינים אזרחיים רגילים. מכוניות תופת עלולות להתפוצץ בקרבה לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים. כמו כן, במקרים מסוימים מכוניות תופת עלולות להתפוצץ בחללים פנימיים של בניינים כאלה, אם הם נגישים לכלי רכב, כמו במקרים של חניונים הקיימים בקומות הכניסה ו/או בקומות תת קרקעיות של בניינים מסוג זה. פיצוץ מכונית תופת מחוץ לבניין דומה לפגיעה קרובה של רש"קים בעלי כמות חומר נפץ גדולה במיוחד למדי (מאות קילוגרמים של חנ"מ). חומרת הנזק הצפוי להיגרם לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבתם תלויה, בין היתר, בכמות חומר הנפץ במכונית התופת ומאפייניו השונים, כמו גם במרחק מוקד הפיצוץ מחזית הבניין הנפגע ובמאפיינים הגיאומטריים והמבניים של הבניין הנפגע. המרחק המקונם של מוקד הפיצוץ של מכוניות תופת מחזיתות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים צפוי להיות בטווחים של $z \approx 1.0 \div 2.0$ בקירוב. במצבים אלה עלול הפיצוץ של מכונית התופת לגרום לנזק חמור ואף להתמוטטות חלקית או כוללת של הבניין הנפגע. בצילומים שבאיורים 4.25-4.26 מוצגות דוגמאות של היפגעות בנייני קומות שלודים מבטון מזויין כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבתם. כאשר בניין הנפגע על ידי פיצוץ מכונית תופת בקרבתו הינו בניין בלתי שלוד הכולל קירות בני נושאים מלבנים או בלוקים מסוגים שונים, חומרת הנזקים הצפויים והקיפם עלול להיות חמור ביותר, כפי שניתן להתרשם מצילום שבאיור 4.27.



איור 4.25: התמוטטות בשרשרת של חלקים נרחבים של בניין פדראלי Murrah באוקלהומה
סיטי, כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבת הבניין



4.26 : התמוטטות חלקית בשרשרת של בניין קונונציונאלי שלוד מבטון מזויין כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבתו (בירות – לבנון)



4.27 : התמוטטות כללית של חלק נרחב של בניין בלתי שלוד עם קירות בני נושאים כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבתו(בואנוס איירס – ארגנטינה)

גם בנייני קומות טרומים או מתועשים הכוללים רכיבי חזית ו/או רכיבי תקרה טרומים מבטון מזויין או בטון דרוך צפויים להינזק קשה כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבתם, כפי שניתן להתרשם מעיון בצילום שבאיור 4.28. הצילומים שבאיורים 4.25-4.28 מראים בבירור שפיצוץ מכונית תופת בקרבת בנייני קומות מהסוגים הנדונים עלול לגרום לתופעות של התמוטטות בשרשרת, חלקית או מלאה, של הבניינים הנפגעים. התייחסות נוספת לתופעות של התמוטטות בשרשרת של בנייני קומות אזרחיים רגילים מוצגת בסעיף 4.7 להלן.



4.28 : התמוטטות בשרשרת של חלק מבית מלון בטאבה – מצרים, כתוצאה

מפיצוץ מכונית תופת בקרבתו

במקרים בהם הפיצוץ של מכונית תופת מתרחש בחלל פנימי של בניין אזרחי בלתי מוגן, למשל בחניון תת קרקעי של בניין קומות, או בחלל של קומת כניסה פתוחה של בניין, כמפורט לעיל, השפעות הפיצוץ חזויות להיות אף חמורות יותר, כתוצאה מאפקט הכליאה המלא או החלקי של לחצי ההדף הנוצרים תוך כדי הפיצוץ. הדבר דומה במידה רבה לפיצוץ רש"קים שונים בחלל פנימי של בניינים מסוג זה, העלול להתרחש במצבים מסוימים המתוארים בסעיף 4.2 לעיל. בגלל כמות חומר הנפץ הגדולה עלולה להתרחש פגיעה חמורה במספר רכיבים נושאים ובעקבות זאת עלולה להתפשט הכשל לכדי כשל כולל בשרשרת של כל הבניין. חומרת הנזקים הצפויים להיגרם לבניינים הנדונים במצבים אלה הינה לרוב גדולה במידה רבה מזו הנגרמת על ידי פיצוץ רש"קים מקובלים, זאת מכיוון שכמות חומר הנפץ במכוניות תופת הינה לרוב גדולה יותר מזו הקיימת ברש"קים העלולים לחדור לתוך חללים פנימיים של בניינים מהסוג הנדון בטרם התפוצצותם ומפני שחדירת רש"ק עלולה להגיע למיקום מסוים בבניין בטרם התרחשות הפיצוץ, בדרך כלל בקומותיו העליונות, ואילו מכונית תופת מתפוצצת בתחתית הבניין.

4.5 תגובת בניינים אזרחיים רגילים בשריפה

תגובת בניינים אזרחיים רגילים מהסוגים הנדונים במקרה של התלקחות שריפה בהם תלויה בגורמים רבים ומגוונים. שריפות עלולות לפרוץ בבניינים רגילים כתוצאה מתקלות או מאירועים חריגים המתרחשים לעתים גם בתנאי שימוש רגילים בבניינים אלה. שימוש בחומרי בנייה תקינים מתאימים וקיום הוראות בטיחות אש בסיסיות מצמצמים במידה משמעותית את הסיכון לשריפות בבניינים אזרחיים רגילים.

בניגוד לשריפות רגילות שעלולות להתרחש בתנאים מסוימים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים כמפורט לעיל, שריפות מכוונות הנגרמות כתוצאה מאירועים מלחמתיים ובמיוחד אירועי טרור, כדוגמת פיצוץ מכונית תופת בסמוך לבניין אזרחי בלתי מוגן, או בחלל פנימי של בניין כזה, כגון בקומת עמודים פתוחה או בקומת חנייה תת קרקעית, עלולות להיות הרסניות. שריפות מכוונות כאלה עלולות להתרחש בעקבות פיצוץ מכונית תופת ו/או התנגשות/נגיפה של מכונית תופת או של מיכלית הנושאת חומרים דליקים ונפיצים, ברכיבי שלד של בניינים מסוג זה, כדוגמת עמודים בקומת קרקע של בנייני קומות. תגובת בנייני קומות מהסוגים הנדונים בשריפה תלויה במיקום מוקד השריפה, בגודל מטען האש- בכמות החומרים הדליקים המזינים את האש, במשך השריפה, בתכונות חומרי הבנייה ששמשו לבניית הבניין, בסכימה המבנית שלו ובמצבו הפיזי בטרם התלקחות האש. נקודה אחרונה זו הינה בעלת חשיבות מיוחדת. כאשר השריפה מתלקחת בעקבות פיצוץ של מכונית תופת למשל, הרכיבים המבניים השונים של הבניין הינם במצב ניזוק ברמה זו או אחרת, כתוצאה מהפיצוץ. עקב כך, גם עמידותם בשריפה נפגמת. פגיעה זו בעמידות בפני שריפות יכולה להיות תוצאה ישירה של היווצרות סדקים ושבירים ברכיבי בטון מזויין שונים, החושפים את זיון הרכיבים לטמפרטורות הגבוהות של הלהבות. בנוסף לכך, המערכת המבנית הפגועה הינה שונה מזו המקורית, ויכולתה לשאת את עומסי הכבידה הינה לרוב פחותה מזו של המערכת המבנית הבלתי פגועה.

כאשר השריפה נמשכת זמן ארוך די הצורך, כתוצאה מהתלקחות כמות גדולה של חומר דליק, למשל בעקבות פיצוץ מכונית תופת הנושאת בנוסף לחומרי נפץ גם כמות גדולה של חומרים דליקים, עולה בהדרגה הטמפרטורה של הרכיבים המבניים של הבניין החשופים לאש. כתוצאה מעליית הטמפרטורה משתנות התכונות המיכניות של החומרים מהם עשויים הרכיבים המבניים של הבניין הנפגע, הן של הבטון והן של פלדות הזיון ושל גדילי הדריכה. בהסתמך על נתונים המוצגים בסעיף 2.4.8 בפרק 2 לעיל ניתן לזהות באופן עקרוני שתי תופעות נפרדות, האחת: הקטנת חוזק החומרים, הגורמת להקטנת תסבולת הרכיבים המבניים החשופים לאש, והשנייה: הקטנת מודול האלסטיות של החומרים, הגורמת להגדלה משמעותית של הדפורמציות של הרכיבים המבניים החשופים לאש. דוגמה לשריפה שנגרמה בבניין אזרחי קונוונציונלי בלתי מוגן הכולל שלד בטון מזויין, בעקבות התפוצצות של מכונית תופת בסמוך אליו מוצגת בצילום שבאיור 4.29.

במקרים בהם לא ניתן לכבות את השריפה במהירות עלול הדבר לגרום לכשל כללי של הבניין הנפגע. הסיבה העיקרית לכך היא שילוב קטלני של ירידה משמעותית של החוזק ושל מודול האלסטיות של החומרים מהם בנויים בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים. אלה עלולים להיגרם כתוצאה מעליית הטמפרטורה של הרכיבים המבניים של הבניין הנפגע לרמה של מאות מעלות צלסיוס, כמפורט בסעיף 2.4.8 בפרק 2 לעיל, עקב חשיפתם הממושכת לאש שלא היה ניתן לכבותה במהירות. לאור מגבלות המידע הקיימות בסוגיות אלה ועקב חוסר ההתאמה של התקנים הקיימים, המגדירים את הדרישות בכל הקשור לעמידות אש של מערכות מבניות ושל רכיבים מבניים של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים מבלי להתחשב באופי האיומים

המלחמתיים ו/או איומי הטרור הישימים המפורטים לעיל, יש מקום ליזום פעילות מחקרית עתידית בתחומים אלה.



איור 4.29: שריפה שנגרמה כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בסמוך לבניין אזרחי בלתי מוגן מבטון מזויין

4.6 תגובת רכיבי זיגוג לעומסי הדף

מעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים כוללים חלקים מזוגים רבים, כדוגמת חלונות בגדלים שונים ו/או דלתות מזוגות. בשנים האחרונות התרחב מאוד גם שימוש בקירות מסך מזוגים המהווים לעתים תחליף למעטפות קשיחות של בניינים. ריבוי רכיבי זיגוג בחזיתות של בניינים אזרחיים רגילים מגדיל במידה משמעות את הסיכון להיפגעות אנשים המאכלסים בניינים כאלה, במקרה של מימוש האיומים המלחמתיים או איומי הטרור המפורטים לעיל. עמידות רכיבי זיגוג מקובלים רגילים בפני עומסי הדף ורסס הינה מוגבלת מאוד. בנוסף לכך, זכוכית הינה חומר בנייה פריך המתרסק לרסיסי זיגוג קטנים רבים כתוצאה של חשיפה ללחצי הדף הצפויים להיגרם כתוצאה של פיצוץ בקרבת זו או אחרת לבניין הנפגע. רסיסי זכוכית אלה הינם מסוכנים מאוד לאנשים השוהים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים ועלולים לגרום לנפגעים רבים.

דוגמאות להיפגעות רכיבי זיגוג של מעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כתוצאה של פיצוץ מכונית תופת ורש"קים שונים מוצגות בצילומים שבאיורים 4.30-4.32.



איור 4.30: היפגעות חלונות בחזיתות של בניין כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבתו



איור 4.31: הרס כללי של רכיבי זיגוג בחזיתות של בניין משרדים רב קומות כתוצאה מפיצוץ מכונית תופת בקרבתו



איור 4.32: ניפוח של חלק מחלונות בניין משרדים כתוצאה מפיצוץ רקטה בקוטר 302 מ"מ בקרבת הבניין

מן הראוי לציין בהקשר זה שהעמידות בלחצי הדף של רכיבי זיגוג רגילים הינה נמוכה במידה משמעותית מזו של רכיבי מעטפות בניין רגילות, כגון קירות בני מסוגים שונים, המקובלים בבנייה אזרחית רגילה הנפוצה בישראל. פרמטרים רבים משפיעים על תגובת רכיבי זיגוג ללחצי הדף, ביניהם סוג הזיגוג, עוביו, גודל השטח המזווג (שטח החלון), מרחק ממוקד הפיצוץ, כמות חומר הנפץ המתפוצצת, זווית הפגיעה של לחצי ההדף וכו'. על פי נתונים שנאספו במהלך אירועים מלחמתיים ואירועי טרור שונים ניתן לקבוע שרכיבי זיגוג רבים מאוד צפויים להתנפץ במקרים של פיצוצים במרחקים מקוממים בטווחים של $z \approx 5.0 \div 12.0$. גם במקרה של פיצוץ במרחקים מקוממים גדולים באופן משמעותי ($z \approx 40.0$) צפוי חלק מסוים של רכיבי הזיגוג של מעטפות בניינים רגילים להתנפץ. משמעות הדבר שהסיכון להיפגעות אנשים השוהים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים קיים גם במקרים שבהם הפיצוץ מתרחש במרחק גדול של מספר עשרות ואף מאות מטרים ממוקד הפיצוץ.

4.7 התמוטטות בשרשרת של בניינים

התמוטטות בשרשרת של בניינים ושל מבנים הנדסיים אחרים מוגדרת כאירוע כשל הרסני שהיקפו ומידת החומרה של תוצאותיו הינם נרחבים וחמורים במידה רבה מהיקף ומחומרת הגורם הראשוני המתניע את תהליך הכשל.

כשל או התמוטטות בשרשרת של בנייני קומות, לרבות בנייני מגורים מהסוגים הנפוצים בישראל, עלולים להתרחש עקב סיבות רבות, וביניהן:

- שגיאה תכנונית חמורה;
- שגיאה חמורה במהלך בניית הבניין;

- שגיאה חמורה במהלך פעולות תחזוקה של הבניין ;
- שגיאה חמורה במהלך ביצוע שינויים מבניים בבניין קיים ;
- נגיפה של כלי רכב כבד בעמוד המהווה חלק של המערכת המבנית הראשית של הבניין ;
- שריפה ממושכת מעל או מתחת לרצפה/תקרה של הבניין ;
- פגיעה מלחמתית בבניין (לדוגמא, פגיעה ישירה או קרובה מאוד של פצצות אוויר, רקטות או טילים מסוגים שונים) ;
- פגיעת טרוריסטית בבניין (לדוגמא, התפוצצות של מכונית תופת בקרבה יתרה לבניין או בתוך הבניין, פיצוץ של מטען חבלה מוצמד לרכיב מבני חשוב של הבניין וכו') ;
- שילוב של מספר גורמים (לדוגמא נגיפה של מכונית תופת הנושאת בנוסף לחומרי נפץ גם כמויות גדולות של חומרים דליקים, הגורמת להתפוצצות ולשריפה) ;

פגיעה מלחמתית או פגיעת טרוריסטית נכללים, כאמור לעיל, בין הסיבות שעלולות לגרום, בנוסף לנפגעים/אבידות בנפש ולנזקים לרכיבי הבניין הנפגעים עקב השפעותיהם הישירות, להתפתחות תהליכי כשל נרחבים בחלקים גדולים של הבניין, מעבר לאזור הפגיעה המקורי, ואף לכשל/התמוטטות כללית בשרשרת של כל הבניין הנפגע. מן הראוי לציין שסוגיות של התמוטטות בשרשרת של בניינים ושל מבנים הנדסיים אחרים נחקרו בישראל עד כה בהיקף מוגבל בלבד [54]. אחד הנושאים הבעייתיים בהתמודדות עם סוגיות של מניעת התמוטטות בשרשרת, או צמצום הסכנה להתרחשותה, הוא הקושי הקיים בזיהוי ובכימות הגורמים האפשריים השונים שעלולים להתניע תהליך של התמוטטות בשרשרת.

הניסיון מאירועי התמוטטות בשרשרת של בניינים ושל מבנים הנדסיים אחרים, במיוחד של בנייני קומות, מלמד שבנייני קומות קונוונציונליים הכוללים שלד בטון מזויין יצוק באתר בשילוב עם קירות בני מסוגים שונים, כדוגמת בנייני מגורים המקובלים בישראל, בדרך כלל רגישים פחות לסכנה של התפתחות תהליכי התמוטטות בשרשרת מאשר מבנים טרומים, לפחות אלה מהדור הישן יותר, אשר תוכנו ונבנו לפני שהנושא של הכללת אמצעים לצמצום הסכנה להתמוטטות בשרשרת של בניינים נכלל בתקני תכן ישימים.

על מנת ליעל את הדיון בסוגיות הקשורות לכשל בשרשרת של בניינים ושל מבנים הנדסיים אחרים מציע Starossek [55] מיון של סוגי כשלים בשרשרת, על פי מאפייניהם העיקריים. מיון טיפולוגי של סוגי הכשלים בשרשרת המוצע על ידו מגדיר 6 סוגים עקרוניים של כשלים בשרשרת, כדלהלן :

1. התמוטטות מסוג "חביתית-פנקייק" – Pancake-type collapse

התמוטטות מסוג זה מתאפיינת ע"י הסממנים העיקריים שלהלן :

- כשל תחילי של רכיבים נושאים אנכיים ;
- ניתוק חלקי או מלא ונפילה אנכית בתנועת גוף קשיח של רכיבי מבנה ;
- הפיכת אנרגיה פוטנציאלית לאנרגיה קינטית ;

- נגיפה של חלקי המבנה המנותקים והנופלים בחלקים הנותרים של המבנה;
- כשל של רכיבים נושאים אנכיים נוספים כתוצאה מהעמסתם בעומסי נגיפה;
- התקדמות ההתמוטטות בכוון אנכי;

מאפיין מעניין של סוג זה של התמוטטות הוא שההטרדות העיקריות ברכיבים המבניים הנכשלים (בטרם תחילת ההתמוטטות), הפעולה המרחיבה של הכשל וכוון התפשטות הכשל הינם מקבילים, קרי כולם אנכיים. דוגמא אופיינית לסוג זה של התמוטטות בשרשרת הינה ההתמוטטות בשרשרת של מגדלי מרכז הסחר העולמי בניו יורק בשנת 2001, כתוצאה מפיגוע טרור שבוצע באמצעות נגיפה של מטוסי נוסעים במגדלים אלה.

2. התמוטטות מסוג "רוכסן" – Zipper-type collapse

התמוטטות מסוג זה מתאפיינת ע"י הסממנים העיקריים שלהלן:

- כשל תחילי של אחד או של כמה רכיבים מבניים;
- רדיסטרבוזיה של העומסים הנישאים ע"י הרכיבים שכשלו בין יתר רכיבי המערכת המבנית, בדרך כלל באופן אימפולסיבי, כתוצאה מפתאומיות הכשל התחילי;
- תגובה דינמית של המבנה הנותר לעמיסה האימפולסיבית הנ"ל;
- ריכוזי מאמצים סטטיים ודינמיים ברכיבים מבניים דומים לרכיבים שכשלו תחילה, הסמוכים אליהם, וכשל שלהם כתוצאה מהטרחת יתר;
- התפשטות תהליך הכשל בכוון/ים ניצבים לרכיבים הנכשלים ולכוון העמיסה העיקרי שלהם;

סוג זה של כשל מתאפיין בכך שהעומס העיקרי הפועל על הרכיבים שנכשלים תחילה והפעולה המרחיבה של הכשל וכוון התפשטות ההתמוטטות הינם ניצבים זה לזה בקירוב. התמוטטות בשרשרת מסוג זה מתרחשת כאשר רכיבים מבניים המהווים חלק ממסלולים/חלופים של העברת עומסים, הנוצרים בעקבות הכשל הראשוני, נכשלים כתוצאה מהעמסת יתר, מעבר לתסבולתם הגבולית. התמוטטות בשרשרת מסוג זה עלולה להתרחש למשל במערכות מבניות מומשכות, במקרה שבו כשל כפיפה או גזירה בשדה מסוים גורם להעמסת יתר ולכשל כפיפה בשדות הסמוכים לשדה שבו התרחש הכשל הראשוני.

3. התמוטטות מסוג "דומינו" – Domino type collapse

הצורה המרהיבה של נפילה אחד אחרי השני של שורות ארוכות של בלוקי דומינו, כתוצאה של התהפכות בלוק דומינו בודד, מוכרת לכולם. התמוטטויות מסוג זה עלולות להתרחש גם במערכות מבניות מסוגים מסוימים. המכניזם שמאחורי סוג זה של התמוטטות הינו כדלהלן:

- היפוך של רכיב מבני בודד, בדרך כלל אנכי, בתנועה סיבובית סביב ציר סיבוב בתחתית הרכיב הנכשל;
- הפיכת אנרגיה פוטנציאלית לאנרגיה קינטית;
- נגיפה צידית של החלק העליון של הרכיב הנכשל בצד של רכיב מבני סמוך;

- הפעלת עומס אופקי על הרכיב המבני הסמוך לרכיב שכשל תחילה, הן סטטי (עקב הנטייה האלכסונית של הרכיב הנכשל) והן דינמי (עקב הפעולה הדינמית של הנגיפה);
- היפוך הרכיב המבני הסמוך לרכיב שנכשל תחילה, כתוצאה מהפעלת עומסים אופקיים סטטיים ודינמיים עליו, בעקבות כשל הרכיב הראשון;
- התפשטות תהליך ההתמוטטות לרכיבים מבניים נוספים בכוון ההיפוך של הרכיב המבני הראשון;

תופעת הנגיפה הקיימת בסוג זה של התמוטטות בשרשרת וחשיבותה הרבה בתהליך ההתמוטטות, מצביעים על דמיון מסוים בין סוג זה של התמוטטות בשרשרת להתמוטטות בשרשרת מסוג "חביתית-פנקייק", המוזכרת לעיל. השוני העיקרי ביניהם נעוץ בכך שבמקרה של התמוטטות בשרשרת מסוג "דומינו" העומסים העיקריים הפועלים על הרכיבים הנכשלים (בטרם תחילת ההתמוטטות) הינם לרוב עומסים אנכיים ואילו הפעולה המרחיבה את הכשל וכוון התפשטות ההתמוטטות הינם ניצבים לכוון הפעולה של עומסים אלה – שהם סממנים האופייניים גם להתמוטטות בשרשרת מסוג "רוכסן", כמוזכר לעיל. סוג זה של התמוטטות בשרשרת יכול להתרחש במערכת מבנית מחזורית סדורה של רכיבים נושאים אנכיים, כגון מגדלי פיגום תמירים סמוכים זה לזה. דוגמא נוספת, אף אם שונה במקצת של התמוטטות בשרשרת מסוג זה (בגלל העדר נגיפה ישירה של רכיב מבני מתהפך ברכיב מבני סמוך) הינה התמוטטות בשרשרת של מערכות כבלי חשמל או תקשורת עיליים המותקנים על גבי עמודים/מגדלים גבוהים ותמירים. היא עלולה להיגרם למשל כתוצאה מהיפוך תחילי של עמוד תומך יחיד, או כתוצאה מקריעת חוטי חשמל או תקשורת במקום מסוים, הגורמת להפעלת עומסים אופקיים אימפולסיביים על שני העמודים התומכים את כבלים שנקרעו. במקרים אלה התפשטות ההתמוטטות של עמודי התמיכה של המערכת הינה בשני כוונים אופקיים מנוגדים, החל ממקום הכשל הראשוני, לאורך קווי החשמל או התקשורת העיליים הנדונים.

4. התמוטטות מסוג "כשל חתך" - Section-type collapse

כשל מסוג זה ישים לרכיבי כפיפה או רכיבים מבניים המוטרחים במתיחה צירית. כאשר חתך רוחבי מסוים של רכיב מבני מוטרח כזה נחתך באופן חלקי, מתרחשת רדיסטריבוציית הכוחות הפנימיים - המאמצים שפעלו בחלק החתך שנחתך ליתר חלקי החתך הנדון. הגדלת המאמצים במקום מסוים בחתך הפגוע עלולה לגרום להרחבת אזור הכשל בחתך ובהמשך אף לכשל החתך כולו. למרות שסוג כזה של כשל לא נהוג לכנות בדרך כלל ככשל בשרשרת, אלא שבר מהיר, מציע Starossek [55] לכלול אותו במסגרת כשלים בשרשרת, במטרה לנצל סממנים מזהים דומים לסוגים אחרים של כשל או התמוטטות בשרשרת. ניתן לראות שהמאפיינים הבסיסיים של "כשל חתך" מהסוג הנדון דומים לאלה של התמוטטות בשרשרת מסוג "רוכסן". על כן, יתכן שבדומה לאפשרות של טיפול בסוגיות של "כשל חתך" בכלים של מכניקת השבר, ניתן לטפל גם בכשל בשרשרת מסוג "רוכסן" בגישות דומות לאלה של מכניקת השבר.

5. התמוטטות מסוג "אובדן יציבות" - Instability-type collapse

כשל מסוג זה אופייני למקרים בהם אירוע מקומי, לעתים שולי למדי, הגורם לכשל של רכיב מייצב, גורם לאובדן יציבות של רכיבים מבניים רבים המוטרחים בעיקר בלחיצה ואף לכשל של

מבנה שלם. מבנים מתוכננים בדרך כלל באופן האמור למנוע אפשרות של היווצרות התמוטטות בשרשרת מסוג זה. למרות זאת, כשל כזה יכול להתרחש, למשל במקרה בו כשל מסיבה כלשהי של רכיב ייצוב של מערכת מסבכים מישוריים או של קורות פלדה גורם לאובדן יציבות של רכיבים או חתכים המוטרחים בלחיצה. המכניזם שמאחורי סוג זה של התמוטטות הינו כדלהלן:

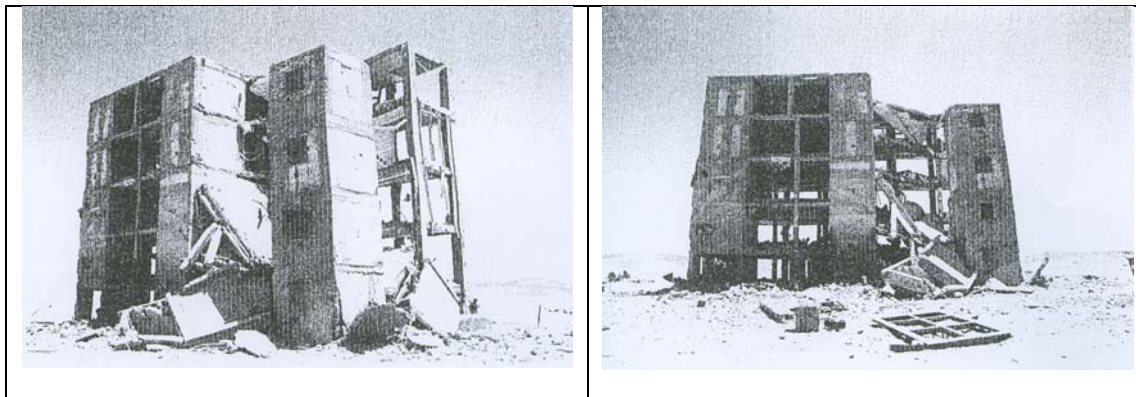
- כשל תחילי של רכיבים/מבנים/מייצבים נושאים המוטרחים בלחיצה;
- הגדלת התמירות ואובדן יציבות של רכיבים/נושאים המוטרחים בלחיצה כתוצאה של הפסקת ייצובם;
- התמוטטות רכיבים/נושאים בלתי יציבים המוטרחים בלחיצה;
- התפשטות תהליך ההתמוטטות לרכיבים מבניים נוספים;

ההגדרה של אי יציבות כוללת בתוכה התייחסות לחוסר הפרופורציה בין ההפרעה, שהיא בדרך כלל קטנה ושולית (למשל אי דיוקים גיאומטריים או חומריים ברמת הרכיב), לתגובת המערכת המבנית להפרעה כזו, שהיא משמעותית מאוד (קריסה/התמוטטות). בזה מזכירה אי יציבות מקרים אחרים של התמוטטות בשרשרת, שאחד ממאפייניה החשובים הינו חוסר הפרופורציה בין האירוע המתניע את תהליך ההתמוטטות להיקפה הכולל. כמו שניתן להגדיר אי יציבות כאחד מהסוגים של התמוטטות בשרשרת, ניתן להתייחס להתמוטטות בשרשרת כאל סוג מיוחד של אי יציבות. רעיון זה יכול לשמש בסיס לפיתוח עקרונות טיפול בבעיות של כשל בשרשרת על פי גישות טיפול בסוגיות של אי יציבות.

6. התמוטטות מסוג "מעורב" – Mixed type collapse

במקרים רבים ניתן להבדיל בקלות בין חמשת סוגי התמוטטות בשרשרת המתוארים לעיל. יחד עם זאת, בעבר התרחשו מספר אירועי התמוטטות בשרשרת במקומות שונים בעולם אשר לא ניתן לסווגם בקלות לאחד מסוגי ההתמוטטות המתוארים לעיל, זאת עקב העובדה שהתגלו בהם מאפיינים של יותר מסוג אחד של התמוטטות בשרשרת. בין המקרים של התמוטטות בשרשרת מסוג "מעורב" ניתן למנות את ההתמוטטות של הבניין הפדראלי Murrah באוקלהומה סיטי בארה"ב בשנת 1995 (איור 4.25), אשר נגרמה כתוצאה מאירוע טרור בו התפוצצה בקרבת הבניין מכונית תופת. ניתוח הממצאים לאחר התמוטטות של בניין זה הצביע על כך שבמקרה זה היו מעורבים בתהליך ההתמוטטות מאפיינים של מתמוטטות מסוג "חביתית", "רוכסן" ואף "דומינו". כך היה הדבר גם במקרה המוצג באיור 4.26 לעיל. דוגמאות אלה ממחישות את הרגישות הרבה של בנייני קומות אזוריים בלתי מוגנים רגילים הנפגעים במהלך אירועים מלחמתיים או אירועי טרור, לסכנות של התמוטטות בשרשרת מסוג "מעורב". בהקשר זה הראוי לציין שבניינים חדשים יותר שתוכנו ובוצעו על פי דרישות תקנים ישימים המתייחסות לאמצעים לצמצום הסכנה להתפתחות של תהליכי התמוטטות בשרשרת [32] ועל פי דרישות עדכניות של תקנות ההתגוננות האזרחית [4]-[6], הכוללים פירי מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים מבטון מזויין רגישים פחות לסכנה של התפתחות תהליכי התמוטטות בשרשרת, גם במקרים של פגיעה מלחמתית או טרוריסטית בהם. האמצעים המוזכרים לעיל, במיוחד פירי ההקשה של המרחבים המוגנים ושל חדרי המדרגות המחוזקים,

אם הם מיושמים בצורה מושכלת בבנייני קומות עשויים לצמצם את ההיקף ההתמוטטות בשרשרת של בניינים אלא, גם במקרים של פגיעה מלחמתית או טרוריסטית חמורה מאוד, כפי שניתן להתרשם מעיון בצילומים שבאיור 4.33. ניתן לראות שבמקרה הנדון קיום פירי בטון מזויין המוזכרים לעיל הבטיח צמצום משמעותי של היקף ההתמוטטות בשרשרת של הבניין הנדון, זאת למרות שפיר המרחבים המוגנים שבצידו הימני של הבניין איבד קומה שלמה כתוצאה של הרס מקומי שלו בקומת הקרקע, אשר נגרם כתוצאה של פיצוץ בקרבתו היתרה, במרחק מקונם של כ- $z \approx 0.8$.



איור 4.33 : התמוטטות חלקית בשרשרת של בניין מגורים קונוונציונלי מבטון מזויין הכולל פיר חדר מדרגות ושני פירי מרחבים מוגנים

דוגמא אחרת של התמוטטות בשרשרת מסוג "מעורב" הינה זו של התמוטטות בניין "וורסאי" בירושלים בשנת 2001, המוצגת בצילום שבאיור 4.34. בניין זה נבנה בשיטת "פל-קל" שלגביה נקבע שנים רבות לפני אירוע התמוטטות זה שהיא שיטת בנייה פסולה ומסוכנת. במקרה זה העלו ממצאי החקירה ההנדסית של הכשל מאפיינים של התמוטטות מסוג "רוכסן" ו"חביתית" גם יחד. מן הראוי להדגיש שאירוע התמוטטות זה לא נגרם כתוצאה של פגיעה מלחמתית או פעולת טרור בבניין הנדון, אלא כתוצאה משימוש בשיטת בנייה מסוכנת, בשילוב עם שגיאות חמורות בתכנון ובביצוע הבניין [56].

כל אחד מחמשת הסוגים הראשונים של ההתמוטטות בשרשרת המתוארים לעיל מתאפיין ע"י סממנים ייחודיים. לעומת זאת, הקטגוריה השישית אינה ניתנת להגדרה ברורה. ייחודיותה בזה שהיא משלבת מאפיינים של מספר סוגי התמוטטות בשרשרת, כאשר השילובים של המאפיינים ומידת חשיבותם ותרומתם לתהליך ההתמוטטות משתנים ממקרה למקרה, כמודגם לעיל. הדבר ממחיש לא רק את הקשיים שעלולים להתעורר בחקירת מקרים של התמוטטות בשרשרת, אלא גם את הקשיים הקיימים בכל הקשור ליישום אמצעים מעשיים בשלב התכנון של בניינים ושל מבנים הנדסיים אחרים, לצמצום הסכנה להתרחשות התמוטטות בשרשרת. אי לכך, יש צורך בפעילות מחקרית מתמשכת בסוגיות אלה.



איור 4.34 : התמוטטות בשרשרת של בניין "וורסאי" בירושלים

בנוסף להגדרת סוגי התמוטטויות בשרשרת המפורטים לעיל מציע Starossek [55] לסווג את סוגי ההתמוטטות בשרשרת המתוארים לעיל למספר קטגוריות. התמוטטויות בשרשרת מסוג "רוכסן" ו"כשל חתך" מאופיינות במידה רבה ע"י רדיסטרובוציה של הכוחות/ההטרחות הנישאים ע"י החלק הכושל של מבנה ליתר חלקיו. על כן, ניתן להגדירם כקטגורית "רדיסטרובוציה" של התמוטטויות בשרשרת. לעומת זאת, התמוטטויות מסוג "חביתית" ו"דומינו", למרות ההבדלים הברורים הקיימים ביניהן, מתאפיינות בכך שכמות משמעותית של אנרגיה פוטנציאלית הופכת לאנרגיה קינטית במהלך הנפילה או ההתהפכות של רכיבים מבניים שונים, אשר מוכנסת בחזרה לתוך המבנה הנותר, בדרך כלל באופן דינמי אימפולסיבי במידה כלשהי. אי לכך, שני סוגים אלה של התמוטטות בשרשרת ניתנים להגדרה בקטגורית "אימפקט" של התמוטטויות בשרשרת.

סוגיה נוספת הקשורה להתמוטטות בשרשרת של בניינים ושל מבנים הנדסיים אחרים שאליה מפנה Starossek [55] את תשומת הלב הינה הצורך בהכרה ובזיהוי הגורמים שעלולים לעודד ו/או לזרז התפתחות של תהליכי התמוטטות בשרשרת. בין גורמים אלה ניתן לכלול:

- פעולה דינמית של עומסים בתהליך הכשל;
- ריכוזי עומסים ו/או מאמצים ברכיבים מבניים הסמוכים לרכיב שנכשל תחילה;
- פריכות חומרים מהם עשויים רכיבים מבניים הסמוכים לרכיב שנכשל תחילה;

ההשפעות של הפעולה הדינמית של העומסים, וכן גם של ריכוזי עומסים ומאמצים, נעשות חמורות יותר ככל שהרכיבים המבניים ומחבריהם הינם פריכים יותר. לעומת זאת, רכיבים מבניים משיכים ומערכות מבניות משיכות מסוגלים לספוג, תוך כדי עיווים לא אלסטיים, אנרגיה קינטית רבה במידה ניכרת מיכולת ספיגת האנרגיה של רכיבים פריכים ומערכות מבניות פריכות. הדבר מאפשר רדיסטרבוציה של עומסים/כוחות ומצמצם ריכוזי כוחות ומאמצים. על כן, הסכנה להתמוטטות בשרשרת של מערכות מבניות משיכות הינה בדרך כלל פחותה במידה רבה מזו של מערכות מבניות פריכות. יחד עם זאת Starosek [55] מציין, שיתכנו גם מקרים שבהם חוזק יתר של רכיבים מבניים מסוימים עלול להוות גורם שלילי שיכול לגרום להרחבת היקף הכשל בשרשרת. לדוגמא, במקרה של התמוטטות בשרשרת מסוג "דומינו", כאשר הפעולה המרחיבה את הכשל נעשית באמצעות רכיבים המקשרים בין רכיבים מבניים עיקריים, הכוחות המועברים בזמן ההתמוטטות ע"י הרכיבים המקשרים ומחבריהם (לדוגמא כוחות מתיחה בכבלים של קו מתח גבוה, או כוחות מתיחה בכבלי דריכה של רכיבים דרוכים מומשכים), הינם בדרך כלל גדולים במידה ניכרת מהכוחות המועברים על ידם במצבי עמיסה רגילים. על כן, רצוי מאוד להימנע מחוזק יתר של רכיבים אלה, על מנת לצמצם את האפשרות להתרחבות הכשל מעבר אזור הכשל הראשוני. אך אפילו אם מתקיים תנאי זה, החוזק בפועל של רכיבים מקשרים אלה יכול להיות כזה שהכוחות הנמסרים באמצעותם בזמן הכשל לרכיבים המבניים העיקריים (לדוגמא לעמודי המתח גבוה, או לנציבי גשר מומשך וכו') יהיו גדולים כל כך שלא ניתן לתכן בצורה סבירה (בעלויות סבירות) את הרכיבים המבניים העיקריים לעמידה בעומסים הקיצוניים שעלולים לפעול עליהם בזמן הכשל. במקרים כאלה יש יתרון לכך שהרכיבים המקשרים בין הרכיבים המבניים העיקריים או מחבריהם לא יהיו משיכים, אלא פריכים, על מנת להגביל את ערך הכוח המועבר באמצעותם ואת משך פעולת העמיסה האימפולסיבית בזמן הכשל, דבר היכול לאפשר גיוס האינרציה של הרכיבים המבניים העיקריים להתנגד לתהליך ההתהפכות הדינמי שלהם. הרעיון של שילוב מספר מוגבל של רכיבים או מחברים בעלי חוזק מוגבל והתנהגות פריכה מוגדרים מראש במקומות מסוימים במערכות מבניות, דומה לשילוב של נתיכים ומפסקי פחת במערכות חשמליות. נתיכים ומפסקי הפחת מיועדים למנוע כשל ונזק חמורים במערכות חשמליות, ע"י מיקוד הנזק והגבלת היקפו וחומרתו. הרעיון של שילוב רכיבים מבניים המיועדים לשמש כעין "נתיכים" פריכים במערכות מבניות משיכות, לצורך צמצום הסכנה להתפתחות תהליכים של התמוטטות בשרשרת ולצורך הגבלת ההיקף והחומרה של הנזק העלול להיגרם להם במקרים של אירועים קיצוניים בלתי חזויים, נראה ככוון מבטיח, גם בראיה של שיפור עמידות בניינים אזרחיים בלתי מוגנים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור, נשוא מחקר זה. יש צורך כמובן להבטיח ש"נתיכים" מבניים פריכים כאלה יהיו בטיחותיים די הצורך, כך שלא יכשלו במצבי עמיסה חזויים שונים, למעט באירועים קיצוניים מוגדרים מראש, כמוזכר לעיל. כמו כן, יש להבטיח שבמקרה של כשל שלהם, הנזק שיגרם למבנה בו הם משולבים יהיה מוגבל ובר תיקון במהירות ובעלויות סבירות. רעיון זה של שימוש ב- "נתיכים" מבניים לצורך הגבלת הנזק הצפוי להיגרם לבנייני קומות אזרחיים בלתי מוגנים במקרה של התרחשות אירוע קיצוני בלתי צפוי, כגון פגיעה מלחמתית או טרוריסטית בהם, מחייב כמובן מחקר ופיתוח נוספים, על מנת להבטיח את היעילות והבטיחות הראויה של מערכות מבניות המשלבות בתוכן "נתיכים" מבניים כאלה.

פרק 5 - אפשרויות לשיפור עמידות בניינים אזרחיים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור

5.1 כללי

בפרקים הקודמים של דו"ח מחקר זה מתוארים האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור השונים הישימים למדינת ישראל, לאוכלוסייתה ולסביבה הבנויה שלה, ומוצג ניתוח איכותי הנדסי של השפעותיהם החזויות על בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, עם דגש על בנייני מגורים. כמו כן, בפרקים אלה מתוארים המאפיינים העיקריים של בנייני מגורים הקיימים בישראל, בחלוקה לפי סוגי המערכות המבניות העיקריות ולפי אופי המעטפות החיצוניות שלהם, תוך התחשבות במועד בנייתם. בהמשך גם הודגמו הנזקים שנגרמו בפועל לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים שונים כתוצאה מפגיעות מלחמתיות או כתוצאה מאירועי טרור.

מהנתונים ומהממצאים המוצגים בפרק 4 לעיל ניתן להתרשם שפגיעות מלחמתיות ופגיעות טרור עלולות לגרום, בנוסף לפגיעה בנפש, גם לנזקים מבניים משמעותיים לסביבה הבנויה, אשר עלולים להיות לעתים חמורים מאוד. הדבר נכון במיוחד לגבי בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים וכו'. היפגעות חמורה של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים כתוצאה ממימוש של איום מלחמתי או איום טרור ישים, עלולה להגביר את הסכנה להיפגעות האוכלוסייה השווה בבניינים מסוג זה בעת הפגיעה בהם. הנזקים הכלכליים הישירים והעקיפים שעלולים להיגרם לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים מהסוגים הנדונים כתוצאה מפגיעה מלחמתית או מאירוע טרור עלולים להיות כבדים. נזקים כלכליים אלה כוללים מרכיבים של השפעות קצרות טווח וארוכות טווח, ובראייה כלל משקית גם השלכות כבדות משקל על יכולת החברה האזרחית להתמודד עם איומים אלה ולתפקד בצורה טובה בתנאי חרום ובעיקר במצב של מלחמה מתמשכת. לאור התגברות האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור בשנים האחרונות יש צורך לשפר את יכולת החברה האזרחית להתמודד ביעילות עם איומים אלה. אחת הדרכים שנקטות בהקשר זה בישראל זה שנים רבות, היא פעילות המכוונת להבטחת מיגון לאוכלוסייה אזרחית של המדינה בשעת חרום, תוך הפניית האזרחים לחלקי מבנה או למבנים מוגנים ברמה זו או אחרת (מחסות חרום, מקלטים על קרקעיים או תת קרקעיים, מרחבים מוגנים וכו') בזמן שהם נתונים להתקפה מלחמתית. מבנים מוגנים מהסוגים הנ"ל נבנים בישראל זה שנים רבות. לעתים הם נבנים כמבנים עצמאיים (למשל מקלטים ציבוריים) ולעתים הם מהווים חלק מבניין אזרחי רגיל שמרבית חלקיו אינם מוגנים (למשל מקלט ביתי, מרחב מוגן קומתי, מרחב מוגן דירתי וכו'). למרות פעילות רבת שנים בתחום בניית מקלטים ומרחבים מוגנים עבור האוכלוסייה האזרחית של ישראל, במטרה להבטיח מיגון נאות לכל האוכלוסייה, בכל רחבי המדינה ובכל שעות היממה, קיימים עדיין פערים משמעותיים למדי בכל הקשור לצרכי המיגון של אזרחי המדינה, במיוחד באזורים עירוניים וותיקים שבהם מרבית הבניינים הקיימים אינם כוללים מקלטים או מרחבים מוגנים כלשהם. מאחר שהאיומים המלחמתיים משתנים עם השנים, הן מבחינת עוצמתם וכמותם והן מבחינת זמן ההתרעה המתקצר הקשור לכך, בהשוואה לעבר, עלולים להיווצר מצבים בהם לא מתאפשרת הגעה לחלל מוגן מבעוד זמן, גם אם הוא מצוי

בקרבת מקום. כאשר מדובר על התקפת טרור, ברוב המכריע של המקרים אין כל התרעה מוקדמת. על כן, יש לצפות שבמקרים רבים של מימוש איומים מלחמתיים או איומי טרור ישימים למדינת ישראל, רבים מאוד מאזרחי המדינה צפויים לשהות בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, או מחוץ להם, ולא במבנים מוגנים (מקלטים, מרחבים מוגנים וכו').

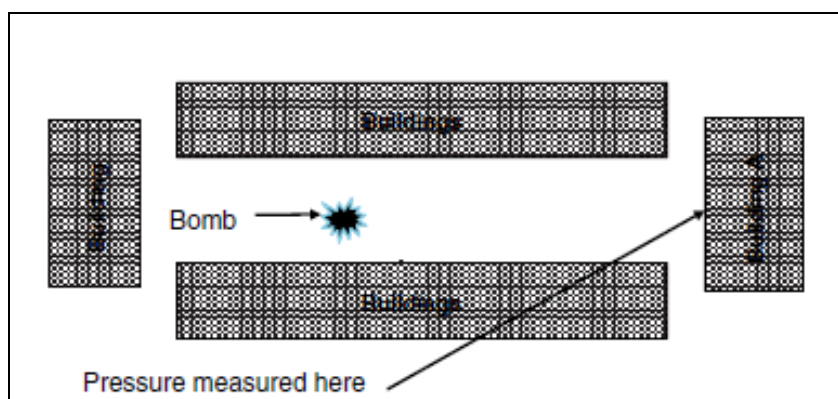
יתר על כן, כל תפישת המיגון הקיימת בישראל לאורך שנים, מתמקד במתן אמצעי הגנה לאוכלוסייה האזרחית, וזאת להבדיל מהגנת התשתית הבנויה כשלעצמה. אין ספק שהגנת האוכלוסייה נמצאת במקום הראשון במעלה מבחינת סדרי העדיפויות לטיפול בסוגיות הנדונות. מתארי מלחמות העבר לא הכבידו על העורף והיקף הנזק לתשתית הבנויה היה קטן מאד. הדבר השתנה עם השנים, כפי שהוכח במהלך מלחמת לבנון השנייה ובמהלך מבצע "עופרת יצוקה". בראייה קדימה של תרחישי מלחמה שעלולים להתהוות בעתיד צפויה החמרה נוספת של הסיכונים להיפגעות עורף המדינה, בהם העורף יהיה חזית במובן של מוקד הפגיעות והנזק. יש לציין כי פתרונות מסוימים של מיגון לאוכלוסייה האזרחית (בראש ובראשונה פירי מרחבים מוגנים ובאופן חלקי גם מקלטים, בעיקר מקלטים פנימיים על קרקעיים), תורמים גם לשיפור עמידתו הכוללת של הבניין בו הם ממוקמים ובכך הם תורמים במידה מסוימת גם לשיפור השרידות של התשתית הבנויה ולא רק למיגון האוכלוסייה.

כל הדברים המתוארים לעיל מובילים למסקנה שיש צורך בבחינת האפשרויות המעשיות של שיפור העמידות המיגונית ושל השרידות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, הן חדשים והן קיימים, כמובן מבלי לפגוע ביכולת התפקוד הרגילה של בניינים אלה ברגיעה, ומבלי לייקרם באופן משמעותי בגין פעולות השדרוג. בסעיפים שלהלן מוצג ניתוח ראשוני של כוונים אפשריים לשיפור העמידות המיגונית של בניינים אזרחיים רגילים, עם דגש על בנייני מגורים. שיפור העמידות המיגונית של בניינים אזרחיים רגילים ניתן להשיג באמצעים שונים. במקרים רבים מדובר באמצעים פשוטים יחסית שאינם כרוכים בעלויות גבוהות. תכנון ותכן מושכלים של בניינים אזרחיים רגילים, אף הוא יכול לתרום רבות לשיפור עמידותם המיגונית. בסעיפים שלהלן מוצגים מספר היבטים שיש להם השפעה על מידת החומרה של ההשפעות השונות במקרה של מימוש איום מלחמתי או איום טרור מוגדרים, ועל תגובת בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים במקרים אלה.

5.2 השפעת תכנית בינוי על עמידות בניינים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור

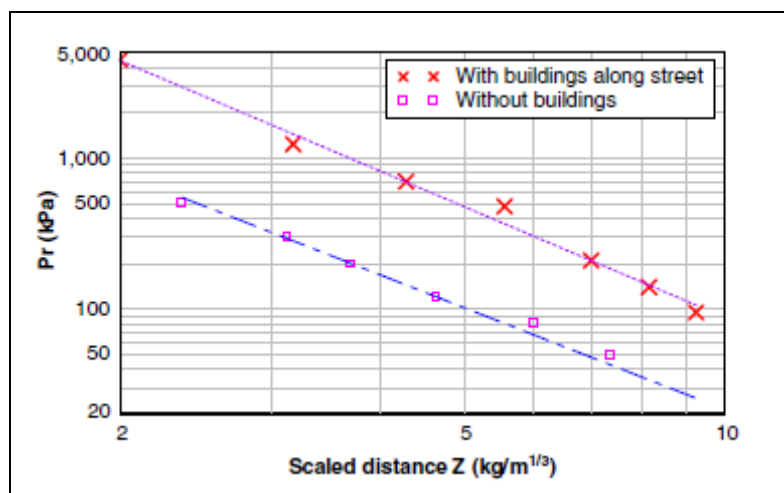
פיצוץ המתרחש בסביבה אורבאנית בנויה גורם, בין היתר, להתפתחות לחצי הדף הפועלים על חזיתות הבניינים השונים הנמצאים באזור. כאשר מדובר בבניין בודד שאין בקרבתו בניינים או עצמים גדולים אחרים, עוצמת לחצי ההדף אלה ומידת החומרה של השפעותיהם על תגובת הבניין הנפגע ועל הנזק הנגרם לו, תלויים במידה רבה במרחק המקונם z של מוקד הפיצוץ מחזית הבניין הנפגע. ככל שמוקד הפיצוץ רחוק יותר מהבניין הנדון וככל שכמות חומר הנפץ המתפוצצת קטנה יותר, כך גדל המרחק המקונם z , ולכן קטנה חומרת השפעות הפיצוץ על הבניין

הנדון, כפורט בפרק 4 לעיל. בדרך כלל בסביבה אורבאנית בנויה קיימים בניינים רבים בתפרוסות שונות, והם מאופיינים בצורות ומידות גיאומטריות שונות. תפרוסת הבניינים בסביבה בנויה משפיעה על עוצמת לחצי ההדף שיפעלו על הבניינים השונים במקרה של פיצוץ רש"ק מוגדר המתפוצץ בקרבת מקום. השפעה זו עשויה להיות במקרים מסוימים חיובית, כמו למשל במקרה של בניין שבינו למוקד הפיצוץ קיים בניין אחר ה"מסתיר" במידה כלשהי את הבניין הנדון מפני חשיפה ישירה ללחצי הדף המתפשטים ממוקד הפיצוץ, וזה מצמצם במידה לא קטנה את חומרת השפעות הפיצוץ הצפויים לפעול על הבניין הנדון. לעומת זאת, במקרים רבים אחרים נוצרות תופעות של "תיעול" לאורך רחובות ותופעות של "החזרות" לחצי הדף מחזיתות של בניינים שונים באזור, ותופעות אלה גורמות דווקא להגברת לחצי ההדף הפועלים על בניינים באזור אורבאני בנוי, בהשוואה ללחצי ההדף הפועלים על בניין בודד שאין סביבו בניינים אחרים. על כן, קיימת חשיבות רבה לתכנון אורבאני מושכל המתחשב בצורה ראויה במכלול היבטים אלה. תכנון מושכל כזה עשוי לאפשר תכן בניינים עמידים יותר בפני השפעות של פיצוצים הנגרמים כתוצאה ממניעושים איומים מלחמתיים או איומי טרור ישימים, כמפורט בפרק 2 לעיל. לעומת זאת, התעלמות מתופעות השונות המוזכרות לעיל, האופייניות לסביבה אורבאנית בנויה, עלולה בתנאים מסוימים לגרום להגברה משמעותית של לחצי הדף ומכאן גם של הנזקים לבניינים הנחשפים להשפעת הפיצוץ, בהשוואה לנזקים הצפויים לבניין בודד זהה שאין בקרבתו בניינים אחרים, אשר חשוף לפיצוץ דומה. על אף חשיבות הנושא, יש קושי בחיזוי השפעות אלה באמצעות כלים חישוביים פשוטים, גם עבור מקרים פשוטים יחסית של תכניות בינוי ערים. ניתן להסתייע בהערכת התופעות והשפעות הגברה אלה בסביבה בנויה בניסויים בקנה מידה מוקטן ו/או באמצעות שימוש בתוכנות מחשב מתקדמות מתאימות, למשל [57], אם כי הדבר כרוך בדרך כלל במשאבי כוח אדם, זמן ותקציב ניכרים. סקירה כללית של סוגיות אלה מוצגת ב- [58]. לצורך המחשת הנושא נתבונן ניתן לעיין באיור 5.1 אשר מציג מקרה פשוט יחסית של פיצוץ המתרחש ברחוב שלאורכו ובקצוות שלו ממוקמים בניינים בגובה אחיד. באיור 5.2 מוצגת השתנות לחץ ההדף המוחזר המירבי הפועל על חזית הבניין הנבדק (הבניין בקצה הרחוב, כמסומן באיור 5.1) בתלות במרחק המקונם של מוקד הפיצוץ מהבניין הנבדק, בהשוואה ללחץ ההדף המוחזר המירבי הפועל על חזית בניין בודד זהה הממוקם באותו מרחק מקונם ממוקד הפיצוץ, שאין בקרבתו בניינים אחרים.



איור 5.1 : מערך בניינים לאורך רחוב בסביבה אורבאנית בנויה

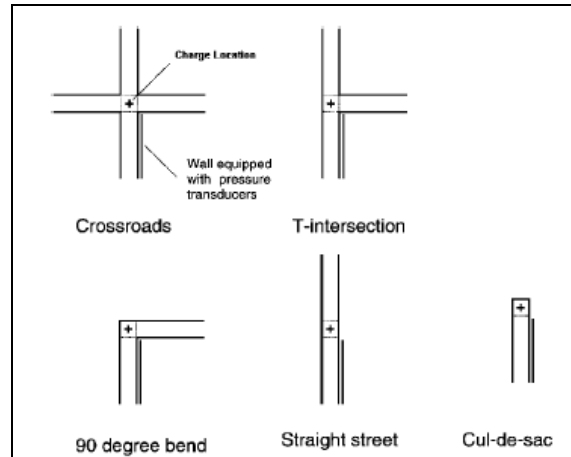
תופעת "כליאה" של לחצי הדף – ע"פ [58];



איור 5.2: לחץ מוחזר מירבי על פני חזית בניין המסומן באיור 5.1 בתלות במרחק המקומי של מוקד הפיצוץ מהבניין בהשוואה לבניין בודד באותו מרחק מקומי של מוקד הפיצוץ – ע"פ [58];

הנתונים המוצגים באיור 5.2 הופקו מניסויי פיצוץ בקנה מידה מוקטן. מעיון בגרפים המוצגים באיור 5.2 ניתן להסיק עקרונית שתופעת "כליאה" של לחצי ההדף המוחזרים בתנאים הנבחנים הנדונים עלולה לגרום לגידול במאות אחוזים (300%-500%) של לחצי ההדף המוחזרים אשר עלולים לפעול על חזיתות של הבניינים הקיימים במערך האורבאני הנתון, בהשוואה למצב בו הבניין הנבחן ממוקם בשטח פתוח ללא בניינים סמוכים אחרים בקרבתו. יש לציין שניסויים אלה בוצעו על דגמים של בניינים קשיחים מאוד שלא כללו חזיתות הצפויות להינזק קשה/להיהרס כתוצאה מהפיצוצים הנדונים. במקרה של פיצוץ המתרחש בסביבה אורבאנית אמיתית הכוללת בניינים אחרים בלתי מוגנים רגילים, חלק ממעטפות הבניינים הנחשפים ללחצי הדף מוחזרים צפוי להינזק מאד ואף להיהרס. הדבר גורם, בין היתר, לחדירת לחצי הדף אל תוך הבניינים הנפגעים. מצד אחד יש לכך השפעה שלילית על מידת הסיכון לאנשים השוהים בבניינים אלה ועל חומרת הנזקים הצפויים להיגרם לחלקים הפנימיים של הבניינים הללו, אך מצד שני עשויה להיות לכך גם השפעה "חיובית" של הפחתה מסוימת של אפקט ה"כליאה" של לחצי ההדף המוחזרים. מערך אורבאני ריאלי מאופיין לרוב על ידי תצורות בינוי מורכבות הרבה יותר מהתצורה המפושטת המוצגת באיור 5.1. באיור 5.3 מוצגות מספר תצורות פשוטות יחסית, אך נפוצות מאוד, של רחובות וצמתים בסביבה אורבאנית בנויה. ניסויי פיצוץ בקנה מידה מוקטן שנערכו על מערכים אורבאניים כאלה, המדווחים ב-[58], מראים אף הם שהאפקטים השונים של הפיצוץ (לחץ מוחזר מירבי, אימפולס מוחזר מירבי), אשר צפויים לפעול על הבניינים השונים במערכים האורבאניים הנדונים הינם חמורים במידה משמעותית בהשוואה לאותם בניינים כאשר הם בודדים בשטח פתוח וממוקמים באותם מרחקים מקומיים ממוקד הפיצוץ. מידת ההחמרה של אפקטים אלה תלויה במידה רבה גם בתצורה הכללית של מערך הרחובות והצמתים. כך למשל בניסויים אלה נמצא שמידת ההגברה של האימפולס המוחזר במערך של רחוב ללא מוצא (Cul-de-sac), כאשר הפיצוץ מתרחש בקצה הסגור של הרחוב ללא מוצא (איור 5.3), הינה בגבולות של 100%-300% בקירוב (בתלות במרחק המקומי של מוקד הפיצוץ מהבניין

הנבחן). לעומת זאת, במערך של 4 רחובות מצטלבים, באשר הפיצוץ מתרחש במרכז הצומת (איור 5.3), הגברת האימפולס המוחזר הינה מתונה במידה ניכרת (תוספת של 0%-100% בקירוב), בתלות במרחק המקום של מוקד הפיצוץ מהבניין הנבחן. בתצורות האחרות של מערכי הרחובות והצומת המוצגים באיור 5.3 מידת ההגברה של האימפולס המוחזר נמצאת בין הגבולות הקיצוניים המוזכרים לעיל.



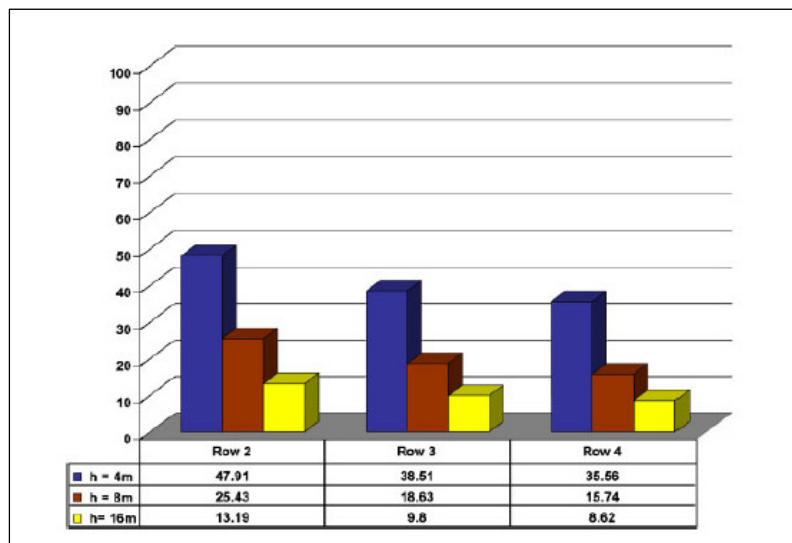
איור 5.3 : מערכים בסיסיים שונים של רחובות וצמתים בסביבה אורבאנית בנויה [58];

בנוסף לפרמטרים שנידונו לעיל יש עוד פרמטרים חשובים שיש להם השפעה על מידת החומרה של השפעת פיצוץ של רש"ק הממוקם בסמיכות לבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים. בין פרמטרים אלה ניתן ציין את רוחב הרחוב בו מתרחש הפיצוץ, את גובה הבניינים ברחוב הנבחן, את מידות האורך והרוחב של המבנים והמרחקים ביניהם, את העמדת הבניין ביחס לרחוב וכו'. תוצאות של ניסויים בקנה מידה מוקטן לצורך בחינת השפעת פרמטרים שונים כגון אלה המוזכרים לעיל, אשר גובו גם בניתוחים חישוביים נומריים באמצעות תכנת מחשב מתאימה, מדווחים אף הם ב- [58]. עיקרי הממצאים מצביעים על כך, שכל שהרחוב המקומם של הרחוב - $w_{sc} = w/W^{1/3}$ (כאשר: w_{sc} הוא רוחב המקומם של הרחוב $(m/kg^{1/3})$, w הוא רוחב הרחוב (מ') ו- W כמות חומר הנפץ המתפוצץ (ק"ג)) גדול יותר, עד גבול מסוים, כך קטן האימפולס המוחזר של הפאזה החיובית של לחצי ההדף המוחזרים הפועלים על חזיתות של הבניינים משני צידי רחוב ארוך. כאשר $w_{sc} > 4.8 m/kg^{1/3}$ הרחוב מספיק רחב על מנת להבטיח שללחצים המוחזרים והאימפולס המוחזר הפועל על חזית של בניין נבדק במערך אורבאני כזה לא יהיו מושפעים מה"החזרות" מבניינים הנמצאים בצד השני של הרחוב. הדבר נכון עבור מרחקים מקוממים ממוקד הפיצוץ של הבניינים לאורך הרחוב, עד למרחק מקומם $z \approx 0 \div 7 m/kg^{1/3}$ בקירוב. באותה סידרה של ניסויים נמצא שהגובה המקומם של הבניינים לאורך הרחוב הנדון $h_{sc} = h/W^{1/3} > 3.2 m/kg^{1/3}$ (כאשר: h_{sc} הוא הגובה המקומם של הבניינים לאורך הרחוב $(m/kg^{1/3})$, h הוא גובה הבניינים לאורך הרחוב (מ') ו- W כמות חומר הנפץ המתפוצץ (ק"ג)), מייצג גובה מזערי של הבניינים שניתן להתייחס אליהם כגבוהים אין-סופית, דבר הבא לידי ביטוי באי הגברה נוספת של הפאזה החיובית של לחצי ההדף המוחזרים ושל האימפולס המוחזר

המרבי על חזיתות הבניינים הנדונים ממפלס פני הרחוב. מידת ההגברה של הפזה החיובית של לחצי ההדף המוחזרים ושל האימפולס המוחזר מחזיתות של בניינים נמוכים יותר הינה פחותה יותר ככל שהגובה המקונם של הבניינים קטן יותר, בהשוואה להגברה המתקבלת במקרה של פיצוץ ברחוב שלאורכו בניינים בעלי גובה מקונם $h_{sc} > 3.2 \text{ m/kg}^{1/3}$, כמצוין לעיל. דבר מעניין נוסף שנמצא בניסויים אלה הוא שכאשר המרחק המקונם של מוקד הפיצוץ מבניין נבדק הממוקם לאורך הרחוב $z > 2 \text{ m/kg}^{1/3}$, האימפולס השלילי הפועל על חזית הבניין החשופה להדף הינו גדול יותר מהאימפולס החיובי. דבר זה נצפה עבור כל מידות הרחוב המקונמות וכל הגבהים המקונמים של הבניינים שהם נמוכים מ- $h_{sc} < 12.8 \text{ m/kg}^{1/3}$. ממצאים אלה יכולים להסביר, באופן חלקי לכל הפחות, תצפיות מדווחות שונות מאירועים אמיתיים של פגיעה מלחמתית או פגיעה באירוע טרור שהתרחשו בסביבה אורבאנית בנויה, לפיהן חלונות מזוגים וקירות מסך מזכוכית של בניינים מרוחקים יחסית ממוקד של פיצוץ התרסקו כלפי חוץ ולא כלפי פנים, כמו בבניינים הקרובים יחסית למוקד הפיצוץ. מכיוון שבסביבה אורבאנית אמיתית הבניינים יכולים להימצא הן בקרבת מוקד הפיצוץ והן הרחק ממנו, בתלות במיקום הפגיעה שהוא אקראי לחלוטין, יש להתחשב בתכן חזיתות של בניינים הן בפאזה החיובית של לחצי ההדף המוחזרים והן בפאזה השלילית שלהם.

במקרים בהם קיימים במערך האורבאני רחובות מקבילים, הבניינים הממוקמים לאורך הרחוב בו מתרחש פיצוץ מסתירים במידה מסוימת את הבניינים הממוקמים ברחובות המקבילים לרחוב הנדון. ניסויים בקנה מידה מוקטן וניתוחים נומריים של מערכי בניינים מהסוג הנדון [58], [59] מצביעים על מספר תופעות הקשורות לאפקט ה"הסתרה" של שורת הבניינים שלאורך הרחוב בו מתרחש הפיצוץ. מידת ה"הסתרה" מוגדרת כמותית כלחץ מוחזר או אימפולס מוחזר הפועל על חזית בניין "מוסתר", המבוטא כאחוז מסוים של הלחץ המוחזר או האימפולס המוחזר הצפוי לפעול על חזית בניין זהה שאינו מוסתר, הממוקם באותו מרחק ממוקד פיצוץ של רש"ק מוגדר (אותו מרחק מקונם של מוקד הפיצוץ). הניסויים הנ"ל מראים שככל שמטען חומר הנפץ הינו קטן יותר, אפקט ה"הסתרה" של שורת הבניינים שלאורך הרחוב שבו מתרחש הפיצוץ הינו יעיל יותר. בנוסף לכך, כל שהבניינים הנדונים הינם נמוכים יותר וכל שמרחקי ההפרדה בין שורות הבניינים המקבילים (הרחוב של הרחובות המקבילים) הינם גדולים יותר, אפקט ה"הסתרה" מצטמצם. כאשר מדובר על בניינים הממוקמים לאורך מספר רחובות מקבילים אפקט ה"הסתרה" המשמעותי ביותר מתקבל עבור הבניינים הממוקמים לאורך הרחוב המקביל הסמוך לרחוב שבו מתרחש הפיצוץ. למספר שורות הבניינים ה"מסתירים" השפעה שולית בלבד על אפקט ה"הסתרה", כפי שניתן להתרשם לדוגמא מהנתונים המוצגים באיור 5.4. ניסויים וניתוחים חישוביים אלה מראים שכאשר מדובר על פיצוץ של כמות מוגבלת יחסית של חומר נפץ (עשרות קילוגרמים של חנ"מ), וכשאר הגובה המקונם של הבניינים הינו $h_{sc} > 3.2 \text{ m/kg}^{1/3}$ והמרחק המקונם בין שורת הבניינים ה"מסתירים" לשורת הבניינים ברחוב המקביל לרחוב שבו מתרחש הפיצוץ הינו $x_{sc} \leq 2.1 \text{ m/kg}^{1/3}$, קטן מהלחץ המוחזר הפועל על החזית של בניין "מוסתר" באופן משמעותי מאוד לשיעור של כ- 10% מהלחץ המוחזר הצפוי לפעול על אותו בניין, כאשר הוא אינו מוסתר. במצב זה האימפולס החיובי הפועל על חזית בניין "מוסתר" קטן לשיעור של 25%-30%

מהאימפולס החיובי הצפוי לפעול על אותו בניין, כאשר הוא אינו מוסתר. מנגד, כאשר מדובר על פיצוץ כמות חומר נפץ גדולה (מאות קילוגרמים של חנ"מ) ועל גובה מקונם של בניינים בשיעור $h_{sc}=0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ וכאשר המרחק המקונם בין שורת הבניינים ה"מסתירים" לשורת הבניינים ברחוב המקביל לרחוב שבו מתרחש הפיצוץ הינו גדול יחסית - $x_{sc} \geq 3.8 \text{ m/kg}^{1/3}$, קטן הלחץ המוחזר הפועל על חזית של בניין "מוסתר" במידה מועטה יותר, לשיעור של כ- 50%-70% מהלחץ המוחזר הצפוי לפעול על אותו בניין, כאשר הוא אינו מוסתר. במצב זה האימפולס החיובי הפועל על חזית בניין "מוסתר" קטן גם כן רק באופן מוגבל לשיעור של כ- 80% מהאימפולס החיובי הצפוי לפעול על אותו בניין, כאשר הוא אינו מוסתר.



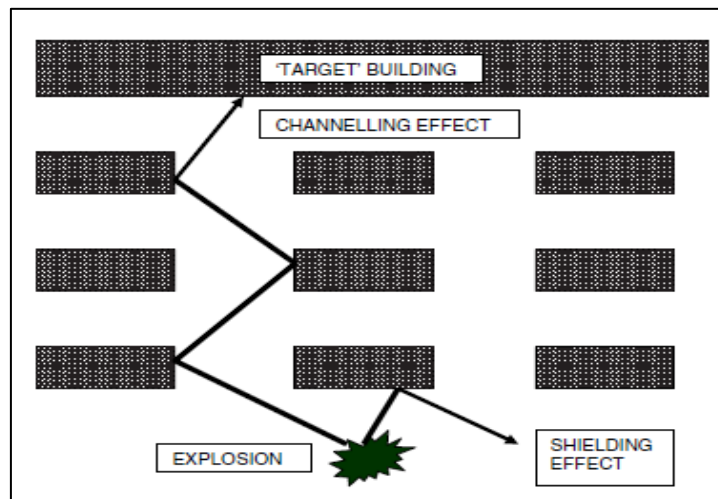
איור 5.4 : מידת ההקטנה של הלחץ המוחזר הפועל על חזיתות של בניינים "מוסתרים"

בשורות מקבילות של בניינים – ע"פ [58]

במערכים אורבאניים ריאליים תמונת המצב של תפרוסת הרחובות, הצמתים והבניינים הינה מורכבת בדרך כלל במידה ניכרת ממערכי בניינים המתוארים לעיל. הדבר בא לידי ביטוי בשילוב של תופעות בעלות השפעות מנוגדות. מצד אחד קיימת תופעת ה"הסתרה" של בניינים מרוחקים ממוקד הפיצוץ על ידי בניינים הסמוכים אליו, כמפורט לעיל, ומצד שני קיימות לעתים קרובות תופעות של "החזרה" ו"תיעול" המגבירות את חומרת ההשפעות של פיצוץ הפועלות על חזיתות של בניינים המרוחקים יחסית ממוקד הפיצוץ. שילוב תופעות אלה מוצג באופן איכותי באיור 5.5.

תופעות מנוגדות אלה מקטינות במידה ניכרת את יעילות תופעת ה"הסתרה". ניסויים בקנה מידה מוקטן שנערכו על מערכים אורבאניים פשוטים יחסית מהסוג המוצג באיור 5.5 הראו שהקטנת הלחצים המוחזרים על חזיתות של בניינים "מוסתרים" אינה עולה בדרך כלל על 10%, בהשוואה ללחץ המוחזר הצפוי לפעול על אותו הבניין, כאשר הוא ממוקם באותו מרחק מקונם ממוקד הפיצוץ ואין מסביבו/בקרבנו בניינים אחרים. הדבר נכון עבור מערכים אורבאניים שבהם צפיפות הבינוי (שטח יחסי של תנוחת הבניינים בהשוואה לשטח הכולל של האזור האורבאני הנבחן) הינה בגבולות של 25%-30%. לאור מכלול תופעות אלה, ובמיוחד לאור העובדה שתכנון אורבאני מושכל יכול להבטיח צמצום משמעותי של היקף תופעות ההינזקות וההרס של בניינים

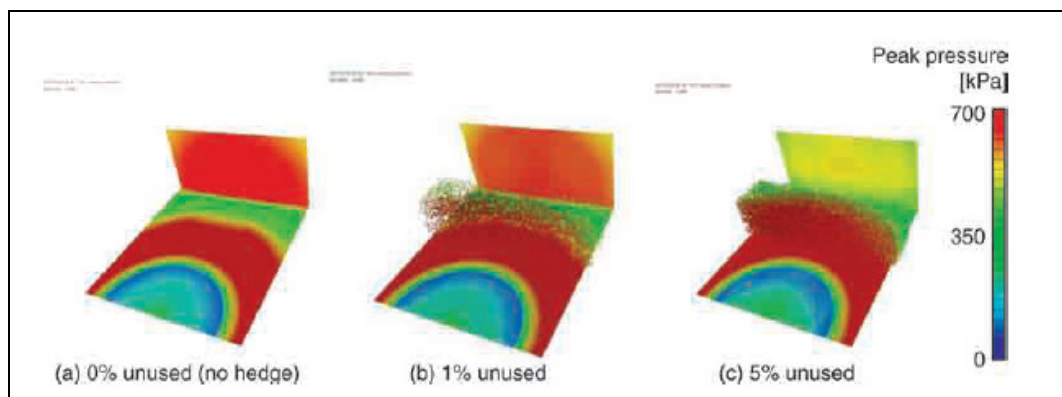
הממוקמים באזורים אורבאניים העלולים להיות חשופים לאיומים מלחמתיים ו/או איומי טרור, יש מקום להמשך מחקר בתחומים אלה, במטרה להוביל לגיבוש כלים הנדסיים/חישוביים יעילים ופשוטים ככל הניתן לצורך הערכה אמינה די הצורך של השפעות של פיצוצים המתרחשים במערכים אורבאניים אמיתיים בתרחישי איום ישימים שונים.



איור 5.5: תאור סכמתי של תופעות "הסתרה" "החזרה" ו"תיעול" – ע"פ [58]

נושא נוסף הקשור לתכנון אורבאני מושכל אשר עשוי לצמצם חלק מההשפעות ההרסניות של פיצוצים שעלולים להתרחש באזורים אורבאניים במקרים של אירועי מלחמה או טרור, הינו שילוב מתאים עיצוב הנוף האורבאני, לרבות שילוב של צמחייה, במיוחד גדרות חיות של שיחים צפופים ושדרות של עצים במערכים אורבאניים [60]. נושאים אלה נחקרו עד כה באופן מוגבל בלבד. לצורך הדגמת הפוטנציאל המיגוני של גדרות חיות של שיחים נערכו ניתוחים נומריים של התפתחות לחצי הדף מוחזרים הצפויים לפעול על חזית של בניין שלאורכו קיימים מערכי שיחים בעלי צפיפות נפחית של 1% ושל 5% בהשוואה למצב בו לא קיימת כל גדר חיה בקרבת הבניין הנבחן [60]. צפיפות נפחית של השיחים מוגדרת כיחס בין נפח החומרים האורגניים (עץ ועלים) לנפח הכולל של השיחים. באיור 5.6 מוצגות תוצאות של ניתוחים חישוביים שבוצעו באמצעות תכנת Autodyn, של פילוג הלחצים המוחזרים המירביים על פני חזית של בניין בשלושה מצבים המתוארים לעיל (בלי גדר חיה, עם גדר חיה בעלת צפיפות נפחית של 1% ועם גדר חיה בעלת צפיפות נפחית של 5%), עבור פיצוץ מטען חומר נפץ על פני הקרקע במרחק מקוונם $z=2.3 \text{ m/kg}^{1/3}$ מחזית הבניין הנבדק. ממצאי הניתוחים החישוביים האלה מצביעים על כך שבמצב הנבחן קיום גדר חיה בעלת צפיפות נפחית של 1% החוצצת בין מוקד הפיצוץ לבניין הנבחן מקטינה את הלחץ המוחזר המירבי הפועל על חזית הבניין בכ- 9% ואת האימפולס המוחזר המירבי בכ- 6%. לעומת זאת, גדר חיה בעלת צפיפות נפחית של 5% מקטינה את הלחץ המוחזר המירבי הפועל על חזית הבניין ב- 39% ואת האימפולס המוחזר המירבי בכ- 25%.

מידת ההקטנה הצפויה של לחצי ההדף המוחזר ושל האימפולס המוחזר תלויה, בנוסף לצפיפות הנפחית של השיחים בגדר החיה, גם במידות הגיאומטריות הכלליות של הגדר החיה (גובה, עובי כולל, אורך), כמו גם בכמות חומר הנפץ המתפוצצת ובמרחק שבין מוקד הפיצוץ לגדר החיה.



איור 5.6 : פילוג לחצים מוחזרים מירביים על פני חזית בניין – (a) בלי גדר חיה לפני הבניין ;

(b) עם גדר חיה בעלת צפיפות נפחית של 1% ; (c) עם גדר חיה בעלת צפיפות

נפחית של 5% - ע"פ [60]

לאור מכלול הנתונים המוצגים לעיל ניתן לקבוע שהפוטנציאל המיגוני הטמון בתכנון נוף אורבאני מושכל ובמיוחד הפוטנציאל המיגוני האפשרי של צמחייה, שיש לה חשיבות רבה בנוף האורבאני גם מהיבטים חשובים אחרים (שיפור איכות הסביבה, צמצום זיהום האוויר, צמצום הרעש וכו'), מצדיקים פעילות מחקרית מתמשכת בסוגיות הקשורות לבחינת הפוטנציאל המיגוני של צמחייה המשולבת בנוף האורבאני.

במקרה של אירוע טרור, כמו למשל פיצוץ של מכונית תופת, יש אמצעים נוספים שעשויים להועיל בהקשר זה, כמו גידור, העמדת מכשולים, ריהוט גן קבוע, יצירת מדרחובים ללא תנועת כלי רכב או עם תנועה מבוקרת של כלי רכב בלבד, וכיו"ב וכל זאת כדי לצמצם את הנגישות של מכונית תופת ולהרחיק את מקום הפיצוץ האפשרי שלה מסביבה בנויה. אין ספק שחלק מאמצעים אלה מכבידים ומפריעים ואינם משתלבים באופן טבעי בסביבה הבנויה, ועל כן רצוי להימנע מהם בדרכי ולינקוט בהם כאשר אין אפשרות אחרת וכאשר מדובר במבנים ומתקנים בעלי חשיבות מיוחדת ולא בהקשר הכללי של בנייה למגורים.

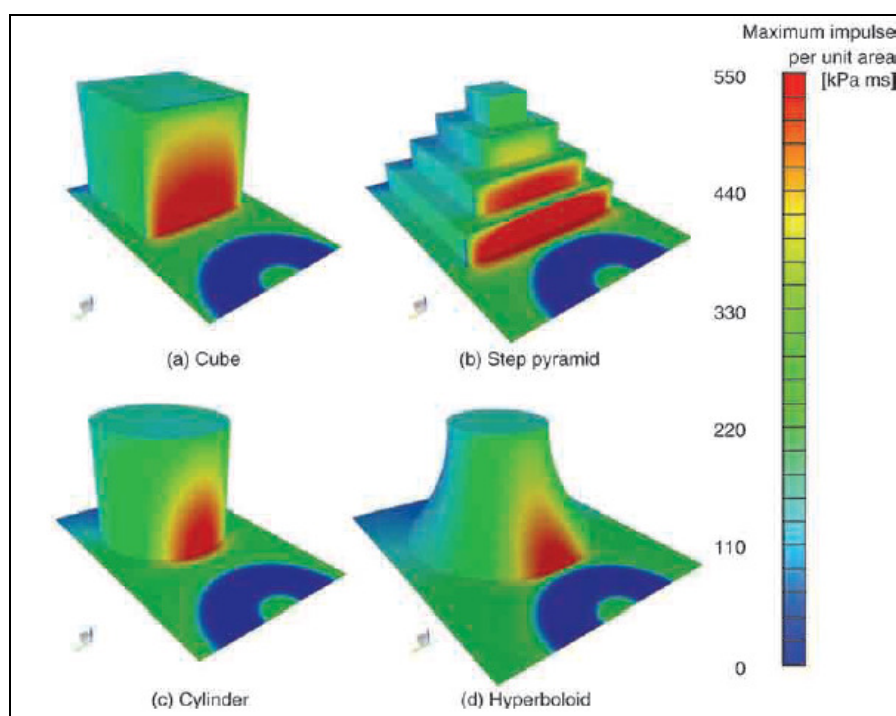
5.3 השפעת צורת הבניין על עמידותו בפני איומים מלחמתיים ואיומי

טרור

לצורה הגיאומטרית של בניינים עלולה להיות השפעה ניכרת על עוצמת לחצי ההדף המוחזר והאימפולס המוחזר הצפויים לפעול על חזיתות של בניינים החשופים לאיומים מלחמתיים ו/או איומי טרור. לנושא זה יש חשיבות רבה לא רק בהיבט של תגובת רכיבי החזית של בניין החשוף

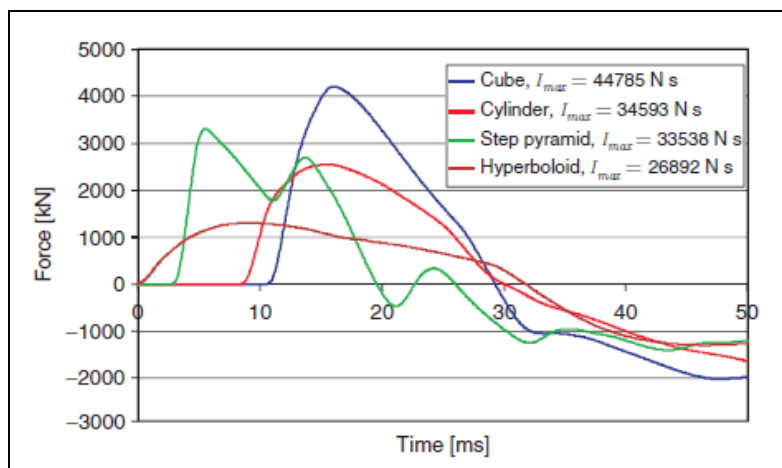
לאיומים מהסוג הנדון, אלא גם לגבי התגובה הכוללת החזויה של הבניין. כך למשל מגרעות משמעותיות בחזיתות של בניינים שמולם מתרחש פיצוץ עלולות לגרום להגברה ניכרת של לחצי ההדף המוחזר והאימפולס המוחזר אשר צפויים לפעול על קטעי החזית שבמגרעות כאלה, כתוצאה מאפקטים של "כליאה" ו"החזרה" המוזכרים לעיל. לעומת זאת, תצורות גיאומטריות מסוימות, לדוגמה חזיתות חלקות של בניינים שתצורתם הגיאומטרית בתנוחה אופקית הינה מעגלית, או תצורה של פוליגון משוכלל רב צלעות (משושה, מתומן וכו') מקטינות את עוצמת לחצי ההדף המוחזר והאימפולס המוחזר הצפויים לפעול על החזיתות של בניינים כאלה, בהשוואה לבניין שתצורתו הגיאומטרית בתנוחה אופקית הינה ריבועית או מלבנית.

ניתוחים נומריים של השפעת התצורה הכללית של בניינים על הלחצים המוחזרים והאימפולס המוחזר הצפויים לפעול על חזיתות של בניינים החשופים לעומסי הדף המוצגים ב- [60] מוכיחים שלצורות גיאומטריות גליליות והיפרבוליות יש יתרונות משמעותיים בהשוואה לתצורות גיאומטריות בעלות פאות מישוריות, כגון קובייה או פירמידה מדורגת. באיור 5.7 מוצגים נתונים לגבי האימפולס המוחזר המירבי ליחידת שטח של חזיתות 4 בניינים בעלי תצורות גיאומטריות שונות (קובייה, פירמידה מדורגת, גליל, היפרבולואיד סיבובי) ונפח זהה, כפי שהתקבלו מתוך חישובים נומריים באמצעות תכנת Autodyn. תוצאות אלה מתאימות לפיצוץ של מטען חומר נפץ במרחק מקונם של $z=6.1 \text{ m/kg}^{1/3}$ ממרכז של כל אחד מהבניינים הנדונים.



איור 5.7 : השפעת התצורה הגיאומטרית של בניינים על האימפולס המוחזר המירבי ליחידת שטח החזית – ע"פ [60]

באיור 5.8 מוצגים נתונים לגבי העומס הכולל הפועל על חזיתות של הבניינים הנדונים בתלות בזמן, וכן נתונים לגבי האימפולס המוחזר הכולל הפועל על 4 הבניינים הנדונים בתנאי הפיצוץ המוזכרים לעיל.



איור 5.8 : עומס הדף כולל בתלות בזמן הפועל על בניינים בעלי תצורות גיאומטריות שונות בתנאי פיצוץ המוצגים באיור 5.7 – ע"פ [60]

המסקנה המתבקשת מניתוחים אלה היא שלתצורה הגיאומטרית הכוללת של הבניין יש השפעה משמעותית על עומסי הדף הצפויים לפעול עליו. על כן, עיצוב מושכל של תצורות גיאומטריות של בניינים אזרחיים רגילים, תוך התחשבות, בין היתר, באיומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים, יכול להבטיח עמידות משופרת של בניינים אלה בפני האיומים הנ"ל.

5.4 השפעת אופן העמדת הבניין על עמידותו בפני איומים מלחמתיים

איומים מלחמתיים שונים המוצגים בפרק 2 לעיל, כדוגמת האיום של שיגור טילים בליסטיים או של הפצצות אוויריות, ישימים במידה זו או אחרת לגבי כל האזורים הבנויים/המאוכלסים ברחבי מדינת ישראל. יחד עם זאת, ישנם בישראל אזורים שונים שבהם קיימים, בנוסף לאיומים מלחמתיים כלליים, גם איומים מקומיים מובהקים, כגון איום של ירי ארטילרי, או איומי ירי של פצצות מרגמה או של רקטות שונות (קטיושות, קסאמים וכו'). אזורים אלה הינם בעיקר אזורים שלאורך גבולות המדינה, דהיינו אזורים הסמוכים ל"קווי עימות", כגון אזורים לאורך הגבול עם לבנון ואזורים הסמוכים לרצועת עזה. האיומים המלחמתיים הספציפיים הישימים לאזורים אלה מעמידים אתגרים מיוחדים בפני מתכנני מבנים בכל הקשור להבטחת מיגון ראוי לאוכלוסיה אזרחית של המדינה המתגוררת באזורים אלה ובהקשר להבטחת עמידות ראויה של בניינים אזרחיים רגילים בפני מכלול האיומים המלחמתיים הישימים. לאור האופי הספציפי של האיומים המלחמתיים המקומיים (סוגי הרש"קים, כווני הירי הצפויים וכו') יש מקום לבחינת האפשרויות לשיפור העמידות של בניינים אזרחיים רגילים בפני איומים אלה, באמצעות תכן מושכל של אופן

העמדת הבניינים השונים במרחב, על מנת לצמצם את מידת הסיכון של חשיפתם להשפעות הרסניות אפשריות של פגיעה מלחמתית בהם.

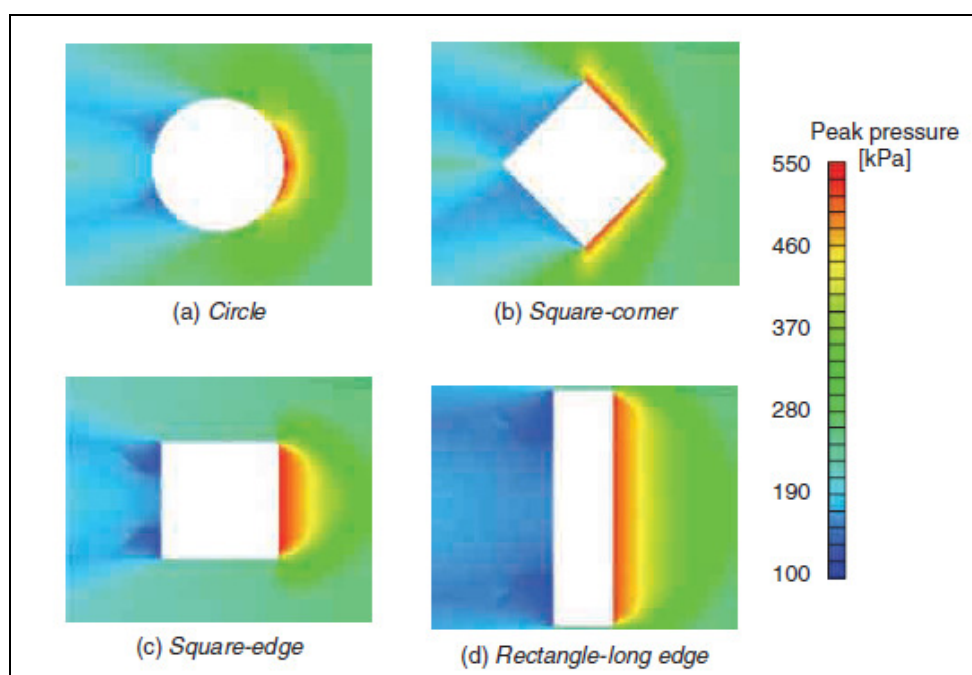
כפי שצוין פורט בפרק 2 ו-4 לעיל, התחמשות ארגונים עוינים ברש"קים בעלי טווח מעוף מוגדל, מטשטשים את האבחנה שלעיל, שהייתה ישימה למלחמות עבר ולאירועי ירי שונים, והופכים את מרבית שטחה של מדינת ישראל אם לא את כולה לחשופה לירי של רש"קים בעלי טווח מעוף ניכר ומטען חומר נפץ גדול. יחד עם זאת, עדיין קיימת אבחנה הנוגעת לאינטנסיביות הירי באזורי עימות ובלב המדינה בעוד שמדי פעם נורים רש"קים לעבר יישובים אזרחיים בתחום מדינת ישראל, הממוקמים באזורי עימות, והכמות המצטברת של ירי מסוג זה גדלה במהלך השנה, הרי שירי אל ריכוזי אוכלוסייה גדולים לא ייחשב כתקרית מקומית ויגרור למלחמה בהיקף גדול יותר ועל כן, על אף שהיכולת והאיום קיימים, הסבירות להתרחשות כזאת הינה קטנה יחסית, לפי שעה.

באזורי העימות המוזכרים לעיל קיים סיכון מוגבר לפגיעה ישירה בבניינים אזרחיים רגילים על ידי רש"קים שונים. ניתן לצמצם את מידת הפגיעות של בניינים אזרחיים רגילים באזורים אלה, למשל על ידי הפנייה של חזית צרה של בניין נתון כלשהו לכוון שממנו צפויים להיות משוגרים הרש"קים הנדונים, במקום להפנות לכוון זה את חזיתו הרחבה. כמו כן, ניתן לצמצם במידה משמעותית את הסיכון לאוכלוסייה האזרחית המאכלסת בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כמו גם את הסיכון להיפגעות חמורה של בניינים אלה, על ידי הימנעות מביצוע פתחים באותם חלקי מעטפת הבניין המופנים לכוון שממנו צפויים להיות משוגרים רש"קי האיום הישימים. במקרים בהם הדבר אינו מתאפשר מסיבות תפקודיות שונות, צמצום מספר הפתחים בחזיתות הנ"ל של הבניינים ושל גודלם, מצמצם אף הוא במידה מסוימת את הסיכונים, הן לאוכלוסייה המאכלסת את הבניינים והן לבניינים עצמם. גם העמדת בניין חשוב יותר (למשל מרפאה) בעל צללית קטנה יחסית מאחורי בניין "רגיל" בעל צללית גדול יותר (במבט מכוון בירי הצפוי) עשויה להקנות מיגון טוב יותר לבניין ה"חשוב"-מיגון זה מוקנה לו על ידי הבניין המחפה עליו.

ניצול מושכל של אופן העמדת בניינים אזרחיים רגילים במרחב הבנוי, תוך התחשבות באופי האיומים המלחמתיים הישימים, מאפשר גם גיבוש פתרונות מיגון ספציפיים לחלקים השונים של בניינים אזרחיים רגילים. דוגמא אפשרית לגישה זו היא שימוש בקירות בטון מזויין בעובי מתאים ועם פרטי זיון מתאימים בחלקי מעטפת הבניין המופנים לכוון שממנו צפויים להיות משוגרים רש"קי האיום הישימים, מול שימוש בקירות בני בקטעים אחרים של מעטפת הבניין שאינם חשופים ישירות לאיומים המלחמתיים הנדונים.

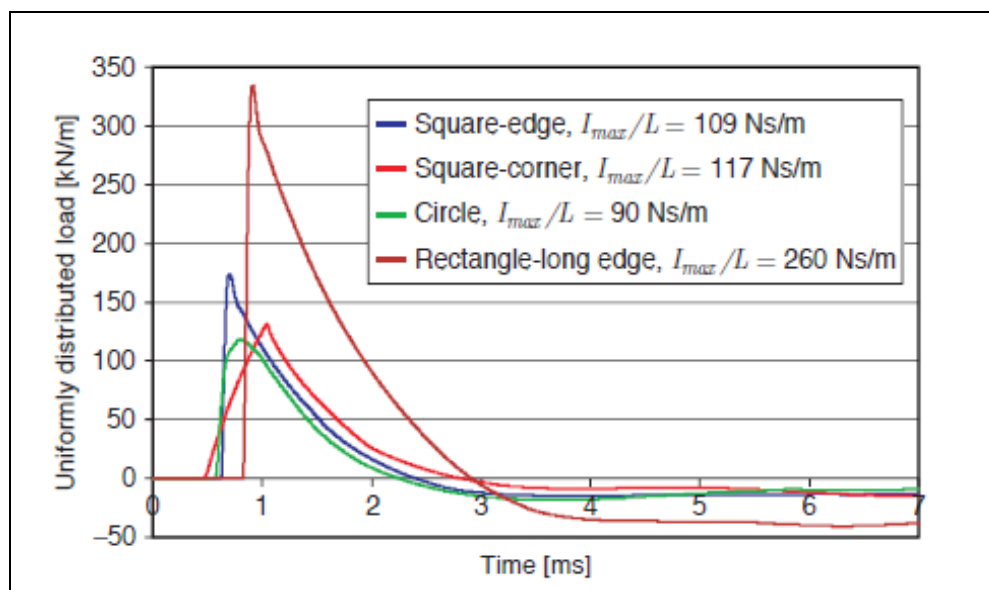
5.5 השפעת הצורה של רכיבים מבניים על עמידותם בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור

בדומה להשפעה המשמעותית שיכולה להיות לתצורה הגיאומטרית הכללית של בניינים על עמידותם בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישירים, גם לצורה הגיאומטרית של רכיבים מבניים שונים, במיוחד של עמודים בדלים של בנייני קומות, יש השפעה משמעותית על עמידותם של רכיבים מבניים בפני האיומים הנ"ל. כך למשל עמוד עגול צפוי להיות חשוף ללחצי הדף פחותים במידה ניכרת מלחצי הדף הצפויים לפעול על עמוד בעל שטח חתך ריבועי שווה ערך (כאשר הפיצוץ מתרחש מול אחת הפאות של העמוד), או על עמוד בעל שטח חתך מלבני. הדבר נובע מזרימה משופרת של גלי ההלם באוויר סביב החתך המעגלי של העמוד. יתרון נוסף של חתכים עגולים של עמודים הינו בסימטריה הסיבובית שלהם, המבטיחה קשיחות אחידה בכל כוון של פעולת הדף אפשרית. על מנת להמחיש היבט זה מוצגים באיור 5.9 נתונים לגבי פילוג הלחצים על פני חתכי עמודים בעלי תצורות גיאומטריות שונות, כפי שהתקבלו מחישובים נומריים באמצעות תוכנת Autodyn, עבור פיצוץ במחק מקונם $z=2.3 \text{ m/kg}^{1/3}$ ממרכזי העמודים הנדונים [60].



איור 5.9 : פילוג לחצי הדף על פני עמודים בעלי חתכים שונים [60]

באיור 5.10 מוצגים נתונים לגבי עומסי ההדף הכוללים הפועלים ליחידת אורך של עמודים בעלי חתך ערב שונים (המוצגים באיור 5.9) בתלות בזמן, כמו גם נתונים לגבי האימפולס המירבי ליחידת אורך של עמודים אלה, כפי שהתקבלו מחישובים נומריים אלה. השוואת תוצאות הניתוחים החישוביים הנ"ל, במיוחד מהיבט של האימפולס המירבי, מצביעה בבירור על היתרונות שיש לעמודים בעלי חתך מעגלי.



איור 5.10: עומסי הדף בתלות בזמן הפועלים על עמודים בעלי חתך ערב שונים

בתנאי פיצוץ המוצגים באיור 5.9 [60]

5.6 השפעת חומרי הבנייה על עמידות בניינים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור

בניינים אזרחיים רגילים המקובלים בישראל, לרבות בנייני מגורים, נבנו בעבר ונבנים גם כיום בדרך כלל בשיטות בנייה קונוונציונליות, כמפורט בפרק 3 לעיל. מרבית הבניינים האלה כוללים שלד מבטון מזויין ומעטפת חיצונית וקירות ומחיצות פנימיים מבלוקי בני מסוגים שונים. מיעוטם של בניינים אלה בנוי בשיטות בנייה טרומות או מתועשות, אף הן מושתתות בדרך כלל על שימוש בבטון מזויין (למשל שיטת הטונלים) ו/או בטון דרוך. כמו כן, קיים בישראל לעתים גם שימוש בשיטות בנייה המכונות "קלות", לצורך בניית בנייני מגורים נמוכים, בעיקר באזורים כפריים, שבהם יש שימוש בשלד מפלדה או מעץ ובמעטפות חיצוניות וקירות ומחיצות פנימיים העשויים מחומרים שונים (רעפי גג מסוגים שונים, לוחות גבס, לוחות שבבים מצומנטים, לוחות פלדה דקים, וכו'). לחומרי הבנייה מהם בנויים בניינים אזרחיים רגילים יש השפעה רבה על מידת עמידותם בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים. בסעיפים שלהלן מוצגים מספר נושאים הקשורים לאפשרויות של שיפור העמידות של בניינים אזרחיים רגילים בפני האיומים הנדונים, באמצעות שימוש מושכל בחומרי בנייה מתאימים למטרות אלה.

5.6.1 רכיבי שלד הבניין

כפי שצוין בסעיף 5.6 ובפרק 3 לעיל מרבית הבניינים האזרחיים הרגילים, ובמיוחד בנייני מגורים, נבנים בישראל תוך שימוש בשלד מבטון מזויין. לבטון המזויין יתרונות שונים מבחינת זמינות ועלות חומרי הבנייה, כמו גם מבחינת מסורת ארוכת שנים של השימוש בו בישראל. לבטון המזויין יש גם יתרונות שונים מהיבטים מיגוניים שונים. יחד עם זאת יש לזכור שהבטון כשלעצמו הינו חומר בנייה בעל חוזק מתיחה ומשיכות מוגבלים למדי. כמו כן, חוזק הלחיצה של

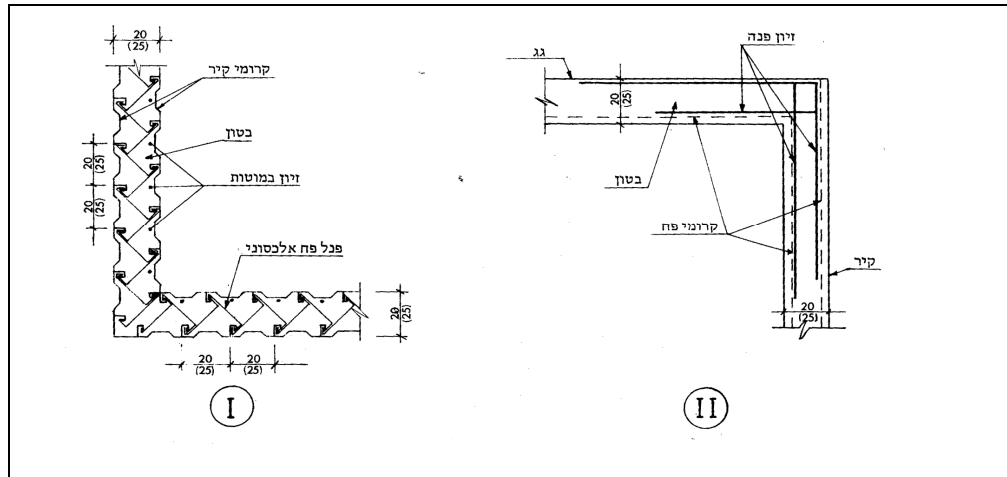
בטונים רגילים, במיוחד של בטונים שהיה בהם שימוש בעבר (בטון ב-15, ב-20), ואף של בטונים המקובלים כיום (בטון ב-30), הינו מוגבל. לאור כל אלה, מידות החתך של רכיבי שלד העשויים מבטון מזויין ואשר עלולים להיות חשופים להשפעות שונות של פיצוצים צריכים להיות גדולים למדי, על מנת להבטיח את עמידותם הנדרשת בפני ההשפעות השונות של האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים השונים (רסס, חדירה, הדף וכו'). בשנים האחרונות התפתחה מאוד טכנולוגיית הבטון וכיום קיימים בטונים איכותיים בעלי תכונות חוזק משופרות באופן משמעותי בהשוואה לבטונים רגילים המוזכרים לעיל. כך למשל בטונים מסוג ב-40, ב-50 או ב-60 נחשבים כיום לבטונים שעלותם אינה גבוהה במידה משמעותית מזו של בטונים נחותים יותר והם זמינים לחלוטין בתעשיית הבנייה בישראל ומקובלים מאוד, בעיקר בבנייה של בניינים אזרחיים רגילים עתירי גובה. בנוסף לבטונים אלה, פותחו בשנים האחרונות גם בטונים עתירי חוזק (בטון ב-100, ב-120 ואף בטונים בעלי חוזק גבוה עוד יותר). בטונים עתירי חוזק מאופיינים בחוזק לחיצה גבוה במיוחד. בטונים אלה הינם גם בעלי חוזק מתיחה ומודול אלסטיות גבוהים יותר מאלה של בטונים רגילים, אם כי הגידול בחוזק המתיחה שלהם בהשוואה לבטונים רגילים אינו באותו שיעור (באותו אחוז), כמו הגידול בחוזק הלחיצה שלהם. בטונים עתירי חוזק אלה הינם פריכים יותר (משיכים פחות) מבטונים רגילים. מכיוון שלמשיכות של רכיבים מבניים יש חשיבות מכרעת מבחינת יכולתם להתמודד עם השפעות הרסניות של פיצוצים היה בעבר חשש להשתמש בבטונים איכותיים (לא רק בבטונים עתירי חוזק, אלא גם בבטונים מטיב ב-40, ב-50 או ב-60) למטרות מיגונות ברכיבים מבניים שונים אשר עלולים להיות חשופים להשפעות של פיצוצים. על מנת להתגבר על בעיות המשיכות של רכיבים מבניים העשויים מבטונים עתירי חוזק נערכו במכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון מחקרים שונים שבמסגרתם פותחו בטונים עתירי חוזק בעלי תכונות משיכות משופרות [61]. בטונים עתירי חוזק אלה עשויים מתערובות בטון מיוחדות בהם משולבים במקרים רבים גם סיבי פלדה מסוגים שונים ובכמויות שונות. בנוסף לפיתוח בטונים מסוג זה נערכו במכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון גם מחקרים שונים הקשורים להתנהגות רכיבי בטון עשויים מבטונים עתירי חוזק [62], [63], שלגבי חלק מהם פורסמו גם דיווחים בספרות המקצועית בחו"ל [64]. בטונים עתירי חוזק אלה הוכיחו את יעילותם המיגונית הן בניסויים מעבדתיים בקנה מידה מוקטן, הן בניסויי שדה בקנה מידה מלא והראו עמידות גבוהה במבחן המעשה במהלך אירועים מלחמתיים שונים. מן הראוי לציין שהפעילות המחקרית בנדון המוזכרת לעיל הינה פעילות ארוכת טווח הנמשכת אף בימים אלה. אחד מכווני המחקר האפשריים בנדון הינו פיתוח דור חדש של בטונים עתירי חוזק איכותיים עוד יותר מאלה הקיימים כיום (בטונים מסוג ב-150, ב-200 ואף יותר). לשימוש עתידי מושכל בבטונים עתירי חוזק בבנייה אזרחית רגילה יש פוטנציאל ממשי לשיפור משמעותי של עמידות בניינים אלה בפני השפעות הרסניות של איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים, כמו גם לשיפור עמידותם ברעידות אדמה.

בנוסף לשימוש בבטונים עתירי חוזק, או בשילוב עימם, ניתן לשפר במידה ניכרת את ההתנהגות של רכיבי שלד מבטון מזויין, תוך שימוש בחתכים מרוכבים של פלדה-בטון מזויין, כאשר פחי פלדה או פרופילי פלדה מתאימים ממוקמים בפני הרכיבים המרוכבים, כמודגם באיורים 5.11 ו-5.12. הדבר מאפשר לצמצם במידה ניכרת את העוביים/מידות החתך של הרכיבים המבניים

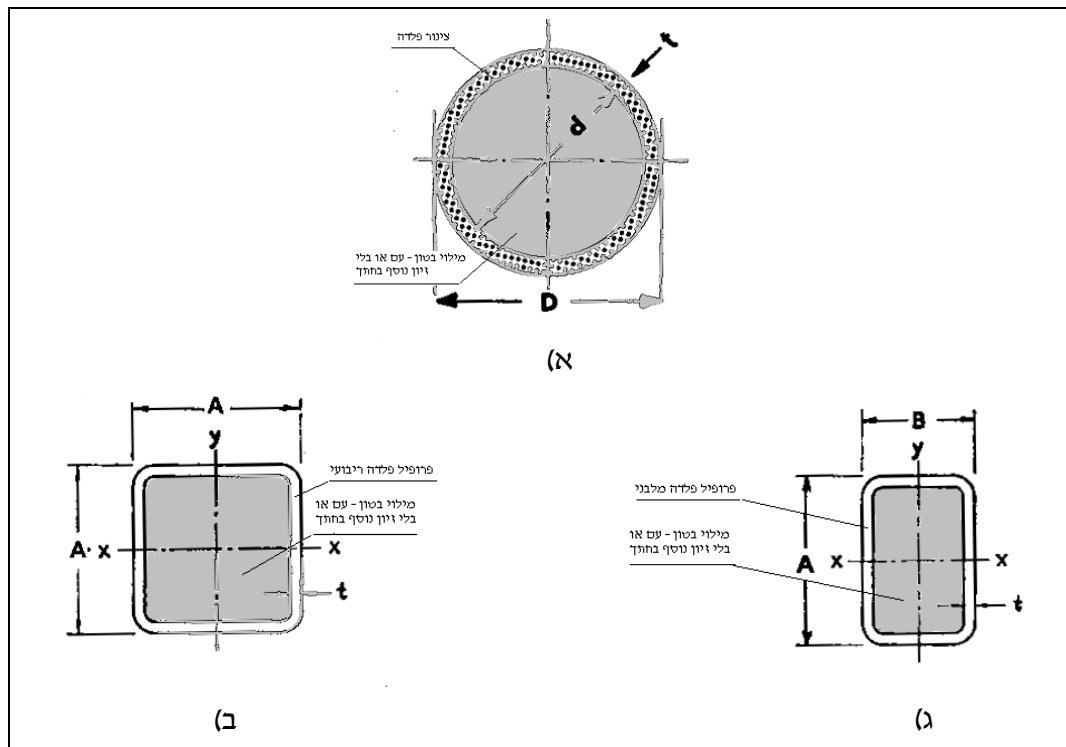
השונים מבלי לפגוע בעמידותם המיגונית, בין היתר, על ידי מניעת תופעות השיחון הצפויות ברכיבים מבניים שעשויים מבטונים רגילים, בעיקר במקרים של פגיעה ישירה בהם על ידי רסס או על ידי רש"קים שונים. מן הראוי לציין ששימוש ברכיבי שלד מרוכבים מהסוג הנדון יכול לשפר גם את ההתנהגות של בניינים בהם הם משולבים באירועי רעידות אדמה חזקות. במכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון בוצעו מספר מחקרי גישוש בנדון [65], [66]. בדרך כלל יש מקום לשקול שימוש בחתכים מרוכבים מהסוג הנדון ברכיבי שלד בדידים, כגון עמודים. כך למשל שימוש בעמודים העשויים מצינורות פלדה או מפרופילי פלדה RHS ממולאים בבטון, עם או בלי תוספת מוטות זיון בתוך הבטון מאפשר שיפור התסבולת וההתנהגות הכוללת של עמודים אלה, בהשוואה לעמודי בטון מזויין רגילים בעלי אותן מידות, כתוצאה מאפקט כליאת הבטון המתקבל הודות לרכיבי פלדה הנ"ל. את מידת הכליאה המירבית של הבטון בעמודים מרוכבים מהסוג הנדון ניתן להשיג בעמודים עגולים. בעמודים מרובעים מידת הכליאה של הבטון הינה פחותה בהרבה מזו המתקבלת בעמודים עגולים. בעמודים מלבניים מתקבלת תרומת כליאה פחותה אף יותר. שימוש ברכיבים מרוכבים פלדה-בטון מזויין יכול להתאים בהחלט גם עבור קירות בטון מזויין ו/או תקרות (בעיקר גגות של בניינים שעלולים להיות חשופים לפגיעות ישירות כתוצאה מאיומים מלחמתיים ישימים שונים), כמפורט בפרק 2 לעיל. בארץ נעשה שימוש ברכיבים מעין אלה בבנייה מוגנת למטרות שונות. מידות החתך של רכיבים מעין אלה המוצגים באיור 5.12 אינן בהכרח מידות החתך הנדרשות עבור בנייה אזרחית רגילה, נשוא מחקר זה, אלא הם מתאימים לרכיבים מבניים של מבנים מוגנים שונים, אשר אמורים לעמוד בפני איומים מלחמתיים שונים מאלה הישימים לבנייה אזרחית רגילה.

אחת הבעיות המרכזיות שעלולות להתעורר בישום פתרונות אלה היא הקושי בבקרת איכות הביצוע של יצוקות הבטון בחתכים מרוכבים המוזכרים לעיל, זאת לאור העובדה שרכיבי הפלדה משמשים למעשה גם כתבנית אבודה, כך שבתום יציקת הרכיבים לא ניתן לבדוק בצורה ויזואלית האם הבטונים שנוצקו אינם כוללים אזורים של בטון שלא צופף כראוי (כיסוי סגרגציית בטון וכו'). על כן, יש מקום לשקול שימוש בבטונים מצטופפים מעצמם – SCC ליציקת רכיבים מבניים אלה, הרגישים הרבה פחות מבטונים רגילים לתופעות אלה. על פי רמת הידע הקיימת כיום, בטונים בעלי חוזקים רגילים מהסוג הנדון זמינים בתעשיית הבנייה בארץ.

לאור הנתונים המפורטים לעיל, יש בהחלט מקום לשימוש בבטונים מצטופפים מעצמם – SCC ברכיבים מרוכבים פלדה-בטון מזויין מהסוג הנדון. יישום של פתרונות מסוג זה מתאים בעיקר לבניינים חדשים, אם כי בתנאים מתאימים ניתן ליישם גם במקרה של שדרוג מיגוני של בניינים קיימים. כמו כן, יש מקום להמשך פעילות מחקרית בנדון, בין היתר בכוון של פיתוח בטונים עתירי חוזק מצטופפים מעצמם – SCC.



איור 5.11: רכיבים מבניים מרוכבים פלדה – בטון מזויין של קירות וגגות (I – חתך אופקי, II) חתך אנכי בחיבור בין קיר לגג;



איור 5.12: חתכים מרוכבים פלדה – בטון של עמודים (א) חתך עגול, (ב) חתך ריבועי, (ג) חתך מלבני;

אפשרות נוספת לשיפור העמידות של בניינים אזרחיים רגילים בלתי מוגנים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים, כמו גם לשיפור עמידותם ברעידות אדמה, הינה באמצעות חיזוק רכיבי בטון מזויין של שלד הבניין באמצעות הדבקת יריעות או רצועות חיזוק מרוכבות על פני רכיבי השלד מבטון מזויין (עמודים, קורות, קירות, תקרות, גגות). יריעות או רצועות החיזוק מושתתות לרוב על שימוש בסיבי שריון מזכוכית, חומרים סינטטיים, כגון Kevlar, או סיבי פחמן.

לצורך הדבקתם על פני רכיבי הבטון המזויין משמשים דבקים סינטטיים שונים. גם בתחום זה נערכו במכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון מחקרים שונים, למשל [67], [68], [69]. גם במדינות אחרות מתבצעת פעילות מחקרית רבה בנושאים הנ"ל, בעיקר במטרה לשפר את העמידות ברעידות אדמה של בניינים קיימים שעמידותם הסיסמית אינה מספקת. בשנים האחרונות, עם התגברות איומי הטרור בכל רחבי העולם גם הפעילות המחקרית בחו"ל מתייחסת לעתים גם לאיומים אלה. פתרונות מסוג זה מיושמים בדרך כלל לצורך שדרוג של רכיבי שלד בבניינים קיימים. מן הראוי לציין כי פתרונות אלה עשויים לשדרג את עמידות הרכיבים בפני פעולת הדף, אולם אין הם תורמים לשיפור העמידות בפני פגיעה ישירה של רסס או של רש"ק ישים. כמו כן, ישלנקוט זהירות בבחינת הישימות של פתרונות כאלה, בכל הנוגע להבטחת המשיכות הנדרשת של הרכיבים המשודרגים, באשר רצועות אלה מתאפיינות בחוזק גבוה אולם מידת משיכותן מוגבלת. גם היבטים אחרים הנוגעים לישימות הנובעות מתכונות חומרים אלה ועמידותם בתנאי אש, קרינה אולטרא סגולה, לחות וכו', וכן גם נתוני הרקע עליו הם מיושמים, צריכים להיבחן בהקשרים הכלליים של היישום.

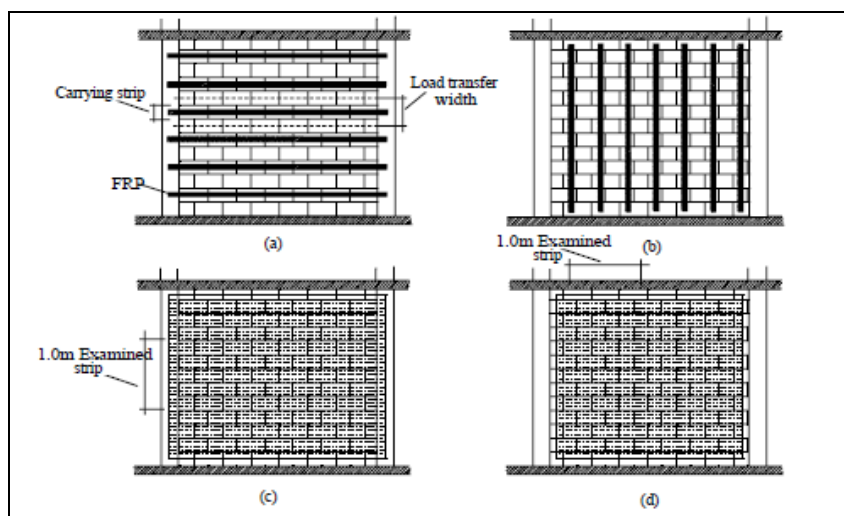
5.6.2 רכיבי מעטפת הבניין

מעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים ובמיוחד מעטפות חיצוניות של בנייני מגורים, אשר נבנו בעבר וגם אלה שנבנים כיום בישראל, כוללים במרבית המקרים קירות בני מסוגים שונים, בדרך כלל בשילוב עם רכיבי שלד מבטון מזויין (עמודים, קורות, קירות הקשחה). על פי המפורט בפרק 3 לעיל קירות בני אלה בנויים לרוב מבלוקי בטון חלולים או מבלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלב (בלוקי "איטונג"). רק במיעוט בנייני המגורים הקיימים, לרוב ישנים למדי, קיים שימוש בלבני סיליקט או בלבני חמר מקשיים. עובי קירות בני הנ"ל הינו בדרך כלל מוגבל יחסית (20-23 ס"מ). מן הראוי לציין שהשימוש בבלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלב בבנייני מגורים התרחב במיוחד בשני העשורים האחרונים, עם התפתחות המודעות לצורך בבידוד תרמי ראוי של בניינים ולאור דרישות התקינה הישראלית בנדון, ובקשר לחיסכון באנרגיה. בלוקים אלה מאופיינים, בין היתר, בתסבולת לחיצה מוגבלת, בהשוואה לתסבולת לחיצה של בלוקי בטון חלולים.

קירות פנימיים ומחיצות פנימיות בבנייני מגורים בנויים לרוב מבלוקי בטון חלולים, בדרך כלל בעלי עובי מוגבל של 20-7 ס"מ.

אירועים מלחמתיים שונים, כמו גם ניסויי פיצוץ מבוקרים שבוצעו בישראל ובמקומות אחרים בעולם בשנים האחרונות הוכיחו שהעמידות בפני השפעות הרסניות של איומים מלחמתיים ושל איומי טרור ישימים שונים, של מעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים רגילים הכוללות קירות בני מהסוגים המוזכרים לעיל הינה מוגבלת למדי. כך הדבר גם לגבי קירות ומחיצות פנימיים בבניינים מהסוג הנדון. ניתן להתרשם מעמידות מוגבלת זו תוך עיון בנזקים שנגרמו לבניינים אלה באירועים מלחמתיים שונים, חלקם מוצגים בפרק 4 לעיל. היפגעות ו/או הרס של קירות ו/או מחיצות בני עלול לסכן מאוד את האזרחים השוהים בבניינים מהסוג הנדון. כמו כן, הנזק הכלכלי שעלול להיגרם כתוצאה ממימוש איום מלחמתי או איום טרור כלשהו צפוי להיות

בתנאים מסוימים משמעותי מאוד. הרס קירות בני באירוע מלחמתי עלול להחליש במידה רבה גם את יכולת הבניין לפתח מסלולים חלופיים להעברת עומסי כבדה במקרה של פגיעה חמורה ברכיבי שלד, ובכך להגדיל את סכנת ההתמוטטות בשרשרת של מבנים אלה. על מנת להתמודד עם סוגיות אלה נערכו בישראל בשנים האחרונות ניסויי פיצוץ שונים על ידי פיקוד העורף, במטרה לבחון אפשרויות שונות של שיפור העמידות של קירות ומחיצות בני בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים. בדרך כלל, הרעיונות השונים של שיפורי מיגון של קירות ו/או מחיצות בני שנבחנו בניסויי פיצוץ של פיקוד העורף וגם כאלה שנבחנו במקומות אחרים בחו"ל, כגון הניסויים המדווחים ב- [70]-[73], נועדו בעיקר לצמצם את הסיכון להיפגעות אזרחים השוהים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים אשר עלולים להיות חשופים להשפעות של הדף, עקב התרסקות קירות בני והעפת רגמות/חלקי בלוקים לחללים הפנימיים של הבניינים הנדונים, ולא דווקא לשפר את העמידות הכוללת של קירות ו/או מחיצות בני בפני הדף ו/או בפני רסס. יחד עם זאת ניתן לציין שחלק מהפתרונות המוצעים לשיפורי מיגון של קירות בני תורמים גם לשיפור בתסבולת הכפיפה של הקירות הנדונים בניצב למישורם, זאת בנוסף לשיפור תסבולת הכפיפה והגזירה שלהם במישורם, שאף לכך יש חשיבות, מבחינת שיפור העמידות הכוללת של הבניינים הנדונים בפני השפעות הדף, כמו גם ברעידות אדמה. במרבית המקרים שיפורי מיגון אלה מושתתים על רעיון של ביצוע ציפוי או חיפוי של קירות ו/או מחיצות בני בצידם הפונה אל חללים פנימיים של בניינים אזרחיים רגילים. הציפויים או החיפויים המוצעים השונים הינם לדוגמא חיפויי פח, יריעות בליסטיות, יריעות או רצועות מחומרים מרוכבים שונים המושתתים על שימוש בסיבי שריון מזכוכית, סיבים סינטטיים כגון Kevlar, או סיבי פחמן, או ציפויים סינטטיים מותזים, למשל ציפויים סינטטיים מותזים על בסיס פוליאוריאק וכו', שחלקם מאוזכרים בסעיף 5.6.1 לעיל. באיור 5.13 מוצגות לדוגמא אפשרויות שונות של שיפור העמידות של קירות או מחיצות בני בפני עומסים הפועלים במישורם, כמו גם עומסים הפועלים במישורם.



איור 5.13: שיטות שונות של חיזוק קירות בני באמצעות רצועות או יריעות שריון- (a) רצועות שריון לרוחב הקיר, (b) רצועות שריון לגובה הקיר, (c) יריעות שריון לרוחב הקיר, (d) יריעות שריון לרוחב הקיר [74];

בנוסף לפעילות הניסויית של פיקוד העורף נערכו במכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון מחקרים עיוניים וניסויים שונים הקשורים לסוגיות של שיפור העמידות של קירות בני בפני עומסים קיצוניים העלולים לפעול עליהם בניצב למישורם [74].

יש מקום לציין שעל מנת לאפשר שיפור משמעותי בהתנהגות של קירות בני במקרים של חשיפתם לעומסים קיצוניים מהסוגים הנדונים, יש צורך לחזקם לא רק בפן אחד (הפונה אל פנים הבניין), אלא משני צידיהם. כמו כן, על מנת לתת מענה מספק לא רק לסוגיות מיגונויות, אלא גם לסוגיות תפקודיות של הבניינים האזרחיים בהם משולבים קירות בני, יש צורך בגיבוש פתרונות של חיזוק קירות בני שאינן מושתתות דווקא על יריעות שריון רציפות או על חומרים סינטטיים מותזים על פני הקירות כמוזכר לעיל, אלא על בסיס רשתות שריון או רצועות שריון מתאימות.

יש צורך בהמשך פעילות מחקרית בתחומים אלה, בעיקר לאור ההחמרה הגוברת של האיומים המלחמתיים השונים בפניהם עומדת מדינת ישראל. בנוסף לכך, יש צורך בהמשך מחקר בסוגיות הנדונות, לאור העובדה שחלק מהפתרונות הקיימים/המוצעים של שיפורי מיגון של קירות בני הינו יקר למדי ו/או אינו עומד בקריטריוני תפקוד הנדרשים מבניינים אזרחיים רגילים. בכל אופן, פתרונות שונים של שיפורי מיגון של קירות בני יכולים להתאים הן עבור בניינים קיימים והן עבור בניינים מתוכננים חדשים.

דרך יעילה אחרת לשיפור העמידות המיגונית של מעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים רגילים הינה דווקא בכוון של צמצום השימוש בקירות בני במעטפות חיצוניות של בניינים מסוג זה. כך למשל שימוש בקירות בטון מזויין, אף בעובי מוגבל למדי, במעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים רגילים עשוי לתרום תרומה רבה לשיפור עמידותם המקומית והכללית של בניינים אלה בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים, כמו גם לשיפור עמידותם ברעידות אדמה חזקות. עצם השימוש במעטפות חיצוניות מבטון מזויין בבניינים אזרחיים רגילים הקיים בשיטות בנייה מתועשות שונות (למשל שיטת הטונלים וכו'), עשוי לצמצם במידה ניכרת את הסיכונים להיפגעות אנשים המאכלסים בניינים אלה בעת התרחשות של אירועים מלחמתיים ו/או אירועי טרור ו/או ברעידות אדמה חזקות. בנוסף לכל אלה, השימוש במעטפות בניין מהסוג הנדון עשוי לצמצם במידה ניכרת את הנזקים הכלכליים הצפויים במקרה של היפגעות הבניינים הנדונים באירועים מלחמתיים, אירועי טרור, או ברעידות אדמה חזקות. התפתחויות טכנולוגיות שונות הקשורות לתיעוש הבנייה ולהרחבה אפשרית של השימוש ברכיבים טרומים מבטון מזויין בבנייה אזרחית רגילה עשויים לסייע בהרחבת השימוש במעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים רגילים המושתתים על שימוש ברכיבי בטון מזויין בעלי תסבולת ומשיכות מתאימים, לרבות רכיבים העשויים מבטונים עתירי חוזק כמפורט בסעיף 5.6.1 לעיל. הדבר יכול לתרום רבות לשיפור עמידותם של בניינים מהסוג הנדון בפני האיומים הישימים השונים. כמובן שפתרונות מעין אלה מתאימים במרבית המקרים עבור בניינים מתוכננים חדשים ולא עבור

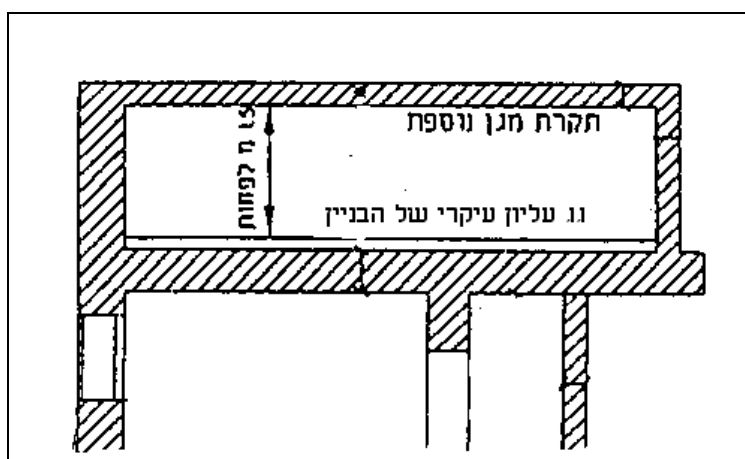
בניינים קיימים שיש כוונה לשדרג את עמידותם המיגונית. מן הראוי לציין שלפתרונות מהסוג הנדון יש גם פוטנציאל כלכלי ממשי, הן בגלל עלותם הנמוכה יחסית, והן בגלל הצמצום המשמעותי החזוי של הנזקים הכלכליים הישירים והעקיפים הצפויים במקרה של היפגעות של בניינים אזרחיים מהסוג הנדון. לאור כל זאת, יש מקום לשקול בכובד ראש שימוש במעטפות מהסוג הנדון בבניינים אזרחיים רגילים, במיוחד באזורים הקרובים לקווי עימות שונים, כמפורט בפרק 2 לעיל.

לאור העובדה שבישראל מקובל מאוד השימוש בחיפויים חיצוניים קשיחים מאבן טבעית או מלאכותית בחזיתות חיצוניות של בניינים אזרחיים רגילים, לרבות בבנייני מגורים, יש מקום לניצול חיפויים קשיחים אלה כחלק מהמערכת המיגונית של בניינים אלה. חומרי חיפוי קשיחים אלה, אם הם מחוברים כראוי אל קירות מעטפת הבניין יכולים, בתנאים מתאימים, לתפקד ביחד עם קיר הרקע עליו הם מיושמים כמערכת מבנית מרוכבת, בעלת תכונות מבניות ומיגוניות משופרות. לאבני חיפוי מסוימות עשויים להיות תכונות חוזק וקושיות גבוהים יחסית לבטון, אשר יקנו לקיר המרוכב עמידות גבוהה יחסית בפני פגיעה ישירה של רסיסים. יחד עם זאת יש לציין שחלק מאופני היישום בפועל של חיפויים חיצוניים קשיחים מהסוג הנדון, כפי שהם מקובלים כיום בישראל, לא רק שאינם תורמים באופן ממשי לשיפור המיגון של בניינים אזרחיים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים, אלא אף עלולים לגרום לסיכון לאנשים, כתוצאה מהינתקות אפשרית של לוחות החיפוי הקשיחים הנ"ל מהרקע שלהם (הקירות החיצוניים של הבניינים), גם בתנאי שימוש רגילים ולא דווקא באת אירועים מלחמתיים ו/או אירוע טרור. לאור כל אלה, יש צורך בפעילות מחקרית מתמשכת בסוגיות הנדונות, במטרה להבטיח בראש וראשונה את הבטיחות הראויה של חיפויים קשיחים מהסוג הנדון בתנאי שימוש רגילים, ועל מנת לבחון באופן מעמיק את מידת התרומה האפשרית שלהם לשיפור המיגון של בניינים אזרחיים רגילים.

בשנים האחרונות הוצעו גם רעיונות שונים לשימוש במעטפות בניין כפולות מסוגים שונים, במטרה לשפר את העמידות המיגונית של בניינים אזרחיים רגילים. על פי גישה מיגונית זו, המעטפת החיצונית ביותר של הבניין הינה מעטפת אשר ניתן להקריבה על מנת לצמצם נזק למעטפת הפנימית יותר. הכוונה היא לאפשר למעטפת ה"קורבן" נזק כבד ואולי גם הרס, על מנת להציל את המעטפת הפנימית במקרה של מימוש איום מלחמתי או איום טרור קשים. מעטפת "קורבן" חיצונית כזו מיועדת להגן על הבניין עצמו ולמנוע היפגעות חמורה של יתר חלקי הבניין ושל האנשים המאכלסים אותו.

ניתן ליישם רעיון זה בצורה פשוטה יחסית בגגות של בניינים אזרחיים רגילים, לדוגמא על ידי שימוש בטבלות "קורבן" עליונות העשויות מחומרים מתאימים, כגון בטון מזויין רגיל, בטון מזויין עתיר חוזק, רכיבים מרוכבים של פלדה-בטון וכו', כמפורט בסעיף 5.6.1 לעיל, שמתחתיהם במרחק מתאים, ממוקמת התקרה עליונה של הבניין העשויה מבטון מקשי. פתרונות מיגון מסוג זה, או דומים להם, מיושמים כיום בישראל באופן מוגבל בבניינים אזרחיים רגילים הממוקמים באזורים הסמוכים לקווי העימות השונים, שבהם קיימת סכנה ממשית

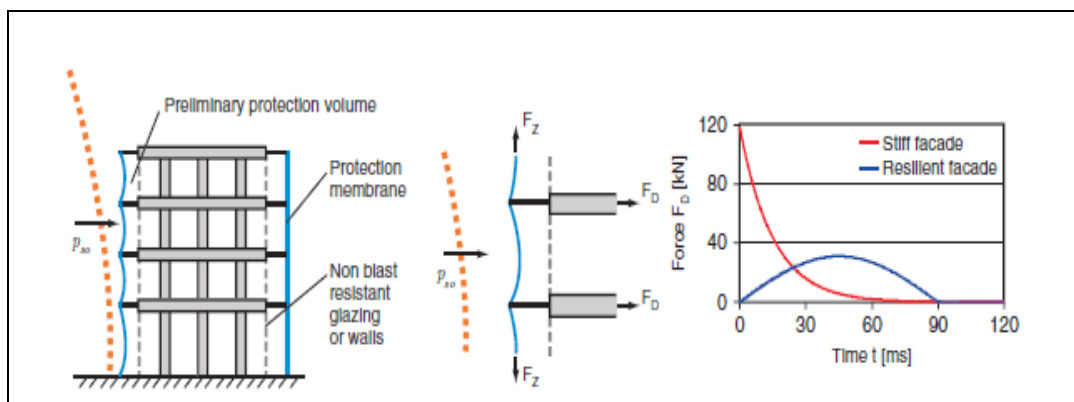
לפגיעה ישירה של רש"ק איום שונים בגגות של בניינים אזרחיים רגילים, על כל המשתמע מכך, מבחינת הסיכונים להיפגעות חמורה של הבניינים הנדונים ושל האנשים המאכלסים אותם. בין היתר, מיושמים כיום פתרונות מיגון מעין אלה בגגות של מרחבים מוגנים בבניינים הממוקמים בישובים המוגדרים על ידי פיקוד העורף כישובים קדמיים, כמודגם באיור 5.14. ניתן ליישם פתרון עקרוני זה על פני כל שטח הגג של בניין אזרחי רגיל, תוך התאמת העוביים של טבלות הגג השונות (טבלת הגג העיקרית וטבלת ה"קורבן" של הגג) לאופי האיום ולנתונים המבניים של הבניין. גישה זו, אם היא מיושמת בצורה מושכלת, מאפשרת גם שדרוג הדרגתי של מיגון בניינים אזרחיים רגילים קיימים, תוך התחשבות באיומים מלחמתיים משתנים במשך הזמן.



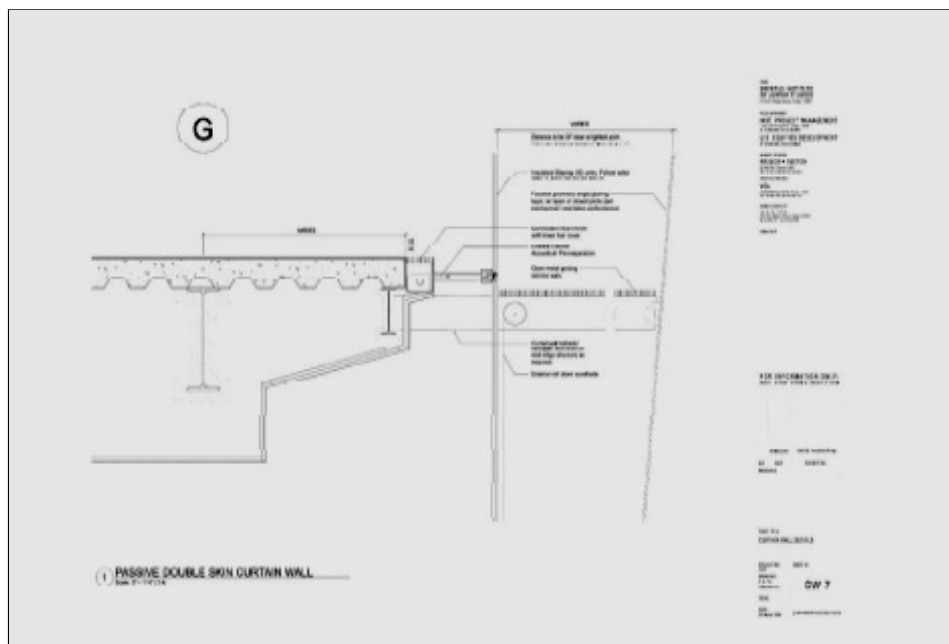
איור 5.14: שימוש בתקרת גג "מוקרבית" מעל גג של מרחב מוגן דירתי בישוב קדמי

בניגוד לגישת המעטפת הכפולה בגגות של בניינים אזרחיים רגילים המוזכרת לעיל, כאשר מדובר על הקירות החיצוניים של בניינים אזרחיים רגילים קיים קושי ממשי ביישום הרעיון המיגוני הנ"ל במתכונת הדומה לזו הניתנת ליישום בגגות של בניינים מהסוג הנדון, כמפורט לעיל. הסיבה העיקרית לכך היא ריבוי פתחי חלונות בחזיתות של בניינים אזרחיים רגילים, המיועדים להבטיח תפקוד נאות שלהם, תוך הבטחת תאורה טבעית ראויה ויכולת אוורור טבעית של החללים הפנימיים של בניינים אלה. לאור זאת הועלו בשנים האחרונות רעיונות שונים לשימוש בחזיתות כפולות שקופות של בניינים אזרחיים רגילים, תוך שימוש בקירות מסך שקופים קשיחים או גמישים, האמורים לשמש בשעת חרום כמעטפת "מוקרבית" של הבניין, תוך הקניית הגנה מסוימת על החלק הפנימי של מעטפת החיצונית של הבניין, כמודגם באיורים 5.15 ו- 5.16. מעטפות "מוקרבות" אלה יכולות להיות עשויות מרכיבי זכוכית מגן שכבתית או מחומרים סינטטיים גמישים ושקופים. מן הראוי לציין שרווח האוויר הנוצר בין המעטפת ה"מוקרבית" למעטפת העיקרית של הבניין צריך להיות פתוח בחלקו, בדרך כלל כלפי מעלה, על מנת לאפשר זרימה חופשית של אוויר בחלל שבין שני חלקי מעטפת הבניין. בשנים האחרונות נבנו ברחבי העולם מספר לא קטן של בניינים, כולל בניינים רבי קומות, שבהם שולבו מעטפות חיצוניות מהסוג הנדון, לאו דווקא משיקולי מיגון, אלא משיקולים של שיפור האקלים הטבעי של בניינים אלה, במטרה לחסוך באנרגיה הנדרשת לאוורור, חימום ו/או קירור שלהם, תוך אימוץ רעיונות של "בנייה ירוקה". ניתן לשלב גישות תכן אלה עם גישות תכן מתאימות בהקשר למיגון בפני

איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים של בניינים אזרחיים רגילים. שילוב כזה של גישות תכן עשוי להניב תוצאות סינרגטיות טובות מאוד. הדבר יכול לתרום בסופו של דבר גם להוזלת העלויות הכלליות הקשורות לבנייה של בניינים כאלה ושימוש ארוך הטווח בהם (לרבות התחשבות בבעלות הכלכלית הכוללת של הינזקותם האפשרית כתוצאה של מימוש איום מלחמתי או איום טרור אפשרי). על מנת לאפשר מיצוי מלוא הפוטנציאל הטמון ברעיונות וגישות תכן אלה נדרשת פעילות מחקרית ארוכת טווח בסוגיות שונות הקשורות לשימוש במעטפות כפולות של בניינים למטרות מיגונית. פעילות מחקרית זו צריכה להיות מכוונת לפיתוח חומרים שקופים בעלי חוזק, משיכות וקיים מתאימים, כמו גם לפיתוח גישות אנליזה ותכן מתאימות, על מנת להבטיח שפתרונות מיגון אלה אכן יבטיחו את העמידות המיגונית הנדרשת של הבניינים הנדונים בפני האיומים המלחמתיים ו/או איומי הטרור הישימים לגביהם.



איור 5.15 : מעטפת חיצונית כפלה של בניינים אזרחיים רגילים החשופים לאיומים מלחמתיים ו/או איומי טרור [60];



איור 5.16 : חתך אנכי דרך מעטפת חיצונית שקופה כפולה של בניין

5.6.3 חלונות זיגוג

חלונות מזוגגים מהווים אחד הרכיבים הרגישים ביותר של בניינים אזרחיים רגילים. הם עלולים להינזק קשה/להיהרס במקרה של התרחשות פיצוץ בסביבה אורבאנית בנויה ולגרום לנפגעים רבים ולאבידות בנפש, בין היתר כתוצאה של היפגעות אנשים מרסיסי זכוכית הנוצרים בזמן התרסקות רכיבי זיגוג כתוצאה של פיצוץ, המועפים במהירות רבה למרחקים גדולים. על מנת לצמצם את הסיכון להיפגעות אנשים השוהים בבניינים אזרחיים רגילים בזמן של התרחשות פיצוץ בקרבתם ניתן לנקוט במספר פעולות כדלהלן:

- לצמצם את כמות החלונות ואת גודלם;
- להשתמש ברכיבי מגן שונים המיועדים לצמצם את לחצי ההדף שעלולים לפעול על חלונות מזוגגים בזמן התרחשות של פיצוץ בקרבת בניין אזרחי רגיל;
- להשתמש בחלונות מזוגגים בעלי עמידות מתאימה בפני הדף;

האפשרות לצמצום הכמות והגודל של חלונות בבניינים אזרחיים רגילים הינה מוגבלת מאוד, לאור דרישות תפקודיות שונות (אוורור, תאורה וכו') השימויות לגבי בניינים מסוג זה. על כן, ניתן לנקוט בגישה זו, וגם זאת רק במידה מוגבלת, לגבי חלונות של מרחבים מוגגים בבניינים מהסוג הנדון. גם האפשרות לשימוש ברכיבי מגן מתאימים, כדוגמת חלונות מגן מפלדה, המיועדים להבטיח שעל החלונות המזוגגים של בניינים אזרחיים רגילים לא יפעלו לחצי הדף שהשפעתם תגרום לכשל החלון הינה מוגבלת למדי. היא מתאימה בעיקר ליישום בחלונות של מרחבים מוגגים המשולבים בבניינים אזרחיים רגילים. יש לכך סיבות שונות, תפקודיות, מבצעיות וכלכליות גם יחד. מן הראוי לציין בהקשר זה שאחד הנושאים החשובים ביותר בבחינה של כל פתרון מיוגני מוצע לגבי בניינים אזרחיים בלתי מוגגים רגילים הינו מידת ההתאמה של הפתרון המיוגני לשימוש ותפקוד היום יומי בבניינים אזרחיים רגילים בעת רגיעה. על כן, יש מקום לחשיבה יצירתית בכל הקשור למיגון חלונות מזוגגים של בניינים אזרחיים רגילים.

אפשרות בעלת פוטנציאל יישומי ממשי בהקשר לשיפור העמידות בפני הדף של חלונות מזוגגים בבניינים אזרחיים רגילים הינה השימוש במעטפות בניין כפולות, שחלקן החיצוני ה"מוקרב" שקוף, כמצוין בסעיף 5.6.2 לעיל. מעטפות בניין כאלה יכולות להיות עשויות מרכיבי זיגוג מגן שכבתית, אשר גם במקרה של כשל שלהם כתוצאה של התרחשות פיצוץ בקרבתם, לא יגרמו ליצירת רסיסי זכוכית מסוכנים העלולים לפגוע באנשים המאכלסים את הבניינים האזרחיים הנדונים.

אפשרות נוספת לשיפור העמידות של חלונות מזוגגים בפני לחצי הדף הינה שימוש בחלונות בעלי חוזק מיכני נדרש וזיגוג מגן שכבתי בעובי מתאים, הנקבעים בהסתמך על איום הייחוס בפניו הם אמורים לעמוד. בהקשר זה נערכו בשנים האחרונות ניסויי פיצוץ רבים, הן בישראל וגם

בחוו"ל, במסגרת פיתוח של חלונות מזוגגים עמידים בפני הדף ברמה מוגדרת. חלק מניסויים אלה בוצעה ביוזמת פיקוד העורף וחלקם האחר נעשה ביוזמת חברות שונות העוסקות בייצור חלונות מסוג זה. באיור 5.17 מוצגים לדוגמא מספר סוגי חלונות מהסוג הנדון לפני ולאחר ניסוי פיצוץ שנועד לבחון את מידת העמידות שלהם בפני הדף ברמה מוגדרת מראש. מעיון באיור זה ניתן להתרשם שההתנהגות הכוללת של החלונות השונים לא הייתה אחידה. חלקם ניזוקו פחות וחלקם האחר ניזוק יותר. יחד עם זאת ניתן לציין שזיגוג המגן השכבתי של כל אחד מחלונות אלה לא התרסק לרסיסים שהועפו אל בפנים הבניין, דבר המצביע על יכולתם המיגונית המשופרת של כל החלונות הנ"ל בהשוואה לחלונות מזוגגים רגילים.

כיום מקובל שימוש בחלונות מהסוג הנדון בעיקר בבנייני ציבור מסוימים שלגביהם נקבע שהם עלולים להוות מטרה ישירה להתקפות עוינות, אך לא בבניינים אזרחיים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים. הסיבות לכך הינן בעיקר כלכליות, מכיוון שהעלות של חלונות מזוגגים בעלי יכולת מיגונית ראויה הינה כיום גבוהה במידה ניכרת מהעלות של חלונות רגילים. יחד עם זאת אין ספק שהתפתחויות טכנולוגיות והרחבת היקף הייצור של חלונות מזוגגים בעלי יכולת מיגונית משופרת צפויים לגרום לירידה הדרגתית במחירים, וזה עשוי להרחיב את היקף השימוש בהם גם לבניינים אזרחיים רגילים, כגון בנייני מגורים.

בשנים האחרונות הולך וצובר תאוצה גם בישראל שימוש בחלונות מזוגגים כפולים, בעיקר בגלל הרצון לשפר את הבידוד התרמי ואת הבידוד בפני רעש של בניינים אזרחיים רגילים. שימוש בחלונות מסוג זה הולך ומתרחב גם בבנייה למגורים. לחלונות מסוג זה עשוי להיות גם פוטנציאל מיגוני משופר. הדבר מחייב כמובן מחקר ופיתוח מתאימים, ויש מקום לפעילות מתמשכת בכיוון זה.

בנוסף לכך, על מנת לבחון באופן ראוי את העלות הכלכלית האמיתית של שימוש בחלונות בעלי יכולת מיגונית משופרת בבניינים אזרחיים רגילים, יש מקום לאימוץ גישת עלות-תועלת כלכלית-הנדסית המתייחסת לא רק לעלות הראשונית של חלונות אלה, אלא גם לתוחלת הנזקים הישירים והעקיפים שעלולים להיגרם כתוצאה מהיפגעותם במהלך תקופת השימוש התכנונית בהם. כמובן שהערכות כלכליות-הנדסיות אלה צריכות להיות מושתתות על ניתוחים סטטיסטיים מתאימים של הסיכונים המלחמתיים השונים העלולים להשפיע על בניינים אזרחיים רגילים מהסוגים הנדונים. יישום גישה כזאת אינו ישיר ופשוט ומחייב פעילות מחקרית בתחום זה.



ב'

א'

5.17 : ניסויי עמידות בפני הדף של חלונות מגן מזוגגים : א' – החלונות לפני הניסוי, ב' – החלונות לאחר הניסוי ;

5.7 השפעת סוג המערכת המבנית על עמידות בניינים בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור

5.7.1 כללי

לסוג המערכת המבנית של בניינים אזרחיים רגילים עשויה להיות השפעה רבה על מידת עמידותם בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים, כמו גם על מידת עמידותם ברעידות אדמה חזקות. מערכות מבניות מרחביות המאופיינות ביתירות מבנית ובעלות מספר רב של דרגות אי סיום הבנויות מרכיבים מבניים משיכים המתחברים ביניהם באמצעות מחברים משיכים היכולים לספוג אנרגיה תוך כדי התפתחות הדרגתית של נזקים ברכיבים המבניים ו/או במחבריהם במקרים של חשיפתם לעומסים קיצוניים מסוגים שונים, הינן מערכות מבניות מועדפות, הן מבחינה מיגונית והן מבחינה סיסמית. על כן, יש חשיבות רבה ליישום מערכות מבניות מהסוג הנדון בכל הבניינים, לרבות בבניינים אזרחיים רגילים, כדוגמת בנייני מגורים.

לאור זאת, יש להימנע משימוש במערכות מבניות בלתי משיכות שעלולות להיכשל בתנאים קיצוניים באופן פריך, גם אם לכאורה יש להם חוזק מתאים. מן הראוי לציין שמערכות מבניות שעלולות להיכשל באופן פריך הינן לרוב גם מערכות מבניות אשר עלולות להיכשל באופן כולל בכשל בשרשרת. הסיכון להיווצרות תופעות אלה עלול להיות מוגבר לגבי בניינים אשר עלולים להיות חשופים לאיומים מלחמתיים ו/או לאיומי טרור חמורים.

שימוש מושכל בחומרי בנייה השונים המוזכרים לעיל, במיוחד בבטון מזויין, תוך נקיטת גישות חישוב ותכן מודרניות, יכולים לצמצם במידה משמעות את הסיכונים המוזכרים לעיל ולאפשר הגשמת המטרות של שיפור המיגון של בניינים אזרחיים רגילים. התייחסות כוללת למכלול העומסים ושילוביהם שעלולים לפעול על בניינים אזרחיים רגילים במהלך תקופת השימוש

התכנונית בהם, לרבות עומסים סיסמיים ועומסי הדף, תוך כדי יישום שיטות תכן תפקודיות מודרניות שהתפתחו בשנים האחרונות (Performance Based Design – PBD), יכולה לאפשר שיפור הבטיחות של בניינים אזרחיים רגילים וצמצום הנזקים הצפויים להיגרם להם במקרה של חשיפתם לאיומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים, כל זאת מבלי לייקרם שלא לצורך.

כפי שפורט לעיל, שימוש מושכל ברכיבים מבניים משיכים מקשיים מבטון מזויין, הן במעטפות חיצוניות של בניינים אזרחיים רגילים והן ביתר רכיבי השלד, המשולבים בצורה ראויה במערכת מבנית מרחבית כמתואר לעיל, עשוי להגביר במידה משמעות את העמידות המיגונית של בניינים אזרחיים רגילים. יש לכך חשיבות רבה לאור התגברות האיומים המלחמתיים השונים בפניהם צריכה לעמוד מדינת ישראל.

5.7.2 מערכות ביסוס

סוג מערכת הביסוס של כל בניין נקבע בראש וראשונה תוך התחשבות בנתוני קרקע הביסוס ובנתונים הגיאומטריים הכלליים של הבניין הנדון (אורך, רוחב וגובה). יחד עם זאת יש להתחשב בתכן מערכות ביסוס של בניינים במכלול העומסים וההשפעות העלולים לפעול עליהן בתקופת השימוש התכנונית בבניינים הנדונים. לכן יש להתחשב במהלך בחירת מערכת הביסוס המתאימה לכל בניין מתוכנן גם באיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים, ובהשפעות החזויות שלהם על מערכות ביסוס של הבניין הנדון. המודעות ההנדסית נתונה לעתים קרובות לחלק העילי של המבנה, ובמקרים רבים ניתנת תשומת לב פחותה למערכת הביסוס בהקשרים הנ"ל. כאשר הדיון מתמקד באיומים מלחמתיים, שיקולים של יתירות מבנית, משיכות, וכיו"ב ישמים באותה מידה גם לגבי מערכת הביסוס, ויש להם השלכה על שרידות המבנה כולו.

מהיבטים מיגוניים יש יתרון ברור למערכות ביסוס רציפות, כגון יסודות דוברה או יסודות עוברים, בהשוואה למערכות ביסוס בדידות, כדוגמת יסודות בודדים או כלונסאות. מערכות ביסוס רציפות רגישות הרבה פחות ממערכות ביסוס בדידות לאפשרות של הינזקות החמורה במקרה של פיצוץ בקרבתם. לאור האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים, יש מקום לשקול יישום מערכות ביסוס רציפות כמוזכר לעיל בכל מקרה שתנאי קרקע הביסוס והנתונים הגיאומטריים הבסיסיים של הבניינים המתוכננים מאפשרים זאת.

אם תנאי קרקע הביסוס אינם מאפשרים יישום מערכות ביסוס רציפות, יש לתכנן את מערכות הביסוס הבדידות של בניינים (יסודות בדידים רדודים או כלונסאות) תוך התחשבות באפשרות של היפגעות חמורה ואף הרס של יסודות/בדידים/הסמוך/ים לאזורי פגיעה אפשריים בסמוך לבניין הנדון. יש להבטיח שגם במצב של פגיעה חמורה ביסוד בדיד כלשהו של הבניין לא יתפתחו תהליכים של כשל כללי בשרשרת של הבניין הנפגע. על מנת לאפשר זאת יש לדאוג, בין היתר, לקיום רכיבים מבניים מתאימים המקשרים בין היסודות הבדידים השונים (ראשי כלונסאות, קורות קשר וכו').

5.7.3 מערכות נושאות ומערכות הקשחה של בניינים

מערכות נושאות עומסים אנכיים ומערכות הקשחה של בניינים אזוריים בלתי מוגנים רגילים יכולות להיות מסוגים שונים ויכולות להיבנות מחומרים שונים. לאור נתונים המוצגים בפרק 3 לעיל ניתן להסיק שבישראל מרבית הבניינים מהסוג הנדון כוללים מערכות נושאות עומסי כבידה ומערכות הקשחה העשויות מבטון מזויין (קונבנציונלי, מתועש או טרום). על פי המוגדר בתקנות ההתגוננות האזרחית הישימות [6] – [4], יש לכלול בכל בניין חדש מרחבים מוגנים ופיר/ים של חדרי מדרגות מחוזקים או ביטחוניים. על פי דרישות המוגדרות בתקנות אלה רכיבים אלה צריכים להיות מבטון מזויין מקשי יצוק באתר. במקרים חריגים הם יכולים להיות גם טרומים, אם כי הדבר מחייב אישור מיוחד של גורמים מוסמכים בפקע"ר. פירי המרחבים המוגנים וחדרי המדרגות המחוזקים/ביטחוניים המוזכרים לעיל מהווים בכל מקרה חלק משמעותי של מערכת הקשחת הבניין בו הם משולבים, בפני עומסים אופקיים מסוגים שונים (עומסי רוח, עומסים סיסמיים, עומסי הדף וכו'). כמו כן, הם מהווים חלק מהמערכת המבנית הנושאת עומסי כבידה. תכן וביצוע של מערכות הקשחה אלה על פי דרישות ישימות של תקנות ההתגוננות האזרחית הישימות [6] – [4], כמו גם דרישות התקנים הישימים השונים [34] – [32] ובמיוחד [42], צריך להבטיח את התנהגותם המשיכה הנדרשת. יש כמובן צורך לבדוק במהלך התכן של כל בניין, האם רכיבים מבניים אלה הינם מספקים מבחינת הבטחת היציבות האנכית ובמיוחד היציבות האופקית של הבניין הנבדק. בדיקה כזו צריכה להתבצע תוך התחשבות במכלול העומסים וההשפעות החיצוניות שעלולות לפעול על הבניין המתוכנן במהלך תקופת השימוש התכנונית בו, לרבות השפעות סיסמיות והשפעות הנבעות ממימוש אפשרי של איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים. במקרה הצורך, ניתן וצריך להוסיף למערכת המבנית של הבניין המתוכנן רכיבי הקשחה נוספים, בדרך כלל קירות גזירה משיכים מבטון מזויין.

מבחינת עמידות בניינים אזוריים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים, כמו גם מבחינת הבטחת עמידותם הסיסמית הראויה, יש יתרונות ברורים למערכות מבניות המשלבות מסגרות בטון מזויין מרחביות משיכות הכוללות עמודים וקורות, עם קירות הקשחה/פירי הקשחה משיכים מבטון מזויין, בהשוואה למערכת מבנית של מסגרות (משיכות או בלתי משיכות) ללא קירות הקשחה/פירי הקשחה משיכים מבטון מזויין. מערכות מבניות מרחביות משיכות מהסוג הנדון יכולות להיות יצוקות באתר בשיטות בנייה קונוונציונליות, כפי שמקובל כיום בישראל במרבית הבניינים החדשים. לאור נתונים אלה יש מקום להעדיף מערכות מבניות מהסוג הנדון על פני מערכות מבניות אחרות, כגון מערכות מבניות לא משיכות, או מערכות מבניות של עמודים בדלים המשמשים לתמיכה ישירה של רצפות/תקרות/גגות, כמפורט בסעיף 5.7.4 להלן. לחילופין, המערכות המבניות הנדונות יכולות להיבנות גם בשיטות בנייה מתועשות או טרומות שונות, זאת בתנאי שהתכן והביצוע שלהן יכולים להבטיח את התנהגותן המשיכה הנדרשת ואת עמידותן במכלול העומסים וההשפעות הצפויות לפעול עליהן בתקופת השימוש התכנונית בבניינים הנדונים, כמפורט לעיל.

על מנת להבטיח תפקוד נאות של המערכות המבניות הנדונות בכל מצבי העמיסה החזויים, לרבות במצבים של מימוש איום מלחמתי או איום טרור כלשהו, יש להבטיח קיום תנאים שונים כמו קשר נאות בין הרכיבים השונים של המערכת המבנית המרחבית, באמצעות דיאפרגמות אופקיות קשיחות במפלסי הקומות השונות של הבניינים בהם הן משולבות, כמפורט בסעיף 5.7.4 להלן.

5.7.4 מערכות מבניות של רצפות/תקרות

למערכות מבניות של רצפות/תקרות, ובמיוחד גגות של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, כגון בנייני מגורים וכו', יש השפעה רבה, הן על העמידות המקומית של רכיבים מבניים אלה, כמו גם על העמידות הכוללת של בניינים אלה בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים ועל חומרת הנזקים שעלולים להיגרם לבניינים אלה במקרה של מימוש איום מלחמתי או איום טרור כלשהו, כמפורט בפרק 4 לעיל. כמו כן, יש למערכות מבניות אלה השפעה רבה על מידת הסיכון להיפגעות אנשים השוהים בבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים במקרה של פגיעה מלחמתית או פיגוע טרור בהם.

מן הראוי להדגיש שמערכות מבניות של רצפות/תקרות/גגות של בניינים בכלל ושל בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים בפרט, משמשות לא רק כרכיבי גישור וקירוי המיועדים לשאת עומסים אנכיים, אלא גם כדיאפרגמות אופקיות (או נטויות בגגות משופעים), אשר יכולות וצריכות להעביר עומסים אופקיים הצפויים לפעול על חלקים שונים של בניינים אלה אל רכיבי ההקשחה האופקית שלהם, כמפורט בסעיף 5.7.3 לעיל. ליכולת תפקודם של רצפות/תקרות/גגות כדיאפרגמות אופקיות יש חשיבות רבה מבחינת הבטחת עמידות ראויה של בניינים אזרחיים רגילים, לרבות בנייני מגורים, בפני איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים, כמו גם מבחינת הבטחת עמידותם הסיסמית הראויה. כמו כן, למערכת המבנית של רצפות/תקרות/גגות של בניינים יש השפעה רבה על מידת הסיכון להתפתחות תהליכי כשל כולל בשרשרת של בניינים בהם הם משולבים, שעלולים להתפתח מסיבות שונות, לדוגמא במקרה של היפגעות חמורה של רכיבי שלד מסוימים של בניין אזרחי בלתי מוגן רגיל כתוצאה מפגיעה מלחמתית או פגיעה בעקבות אירוע טרור. כך למשל, מערכת שלד המבוססת על עמודים בדלים ותקרות מקשיות או תקרות ערוגות ללא קורות רגישה הרבה יותר לאפשרות של התפתחות תהליכי כשל ולהתמוטטות בשרשרת בהשוואה למערכת המבוססת על תקרות מקשיות מצולבות הנשענות על מערכת מרחבית של מסגרות משיכות מבטון מזויין ו/או על קירות הקשחה משיכים מבטון מזויין. הסיבה העיקרית לכך היא רגישות יתירה של תקרות מקשיות ללא קורות הנשענות ישירות על גבי עמודים בדלים ושל תקרות ערוגות ללא קורות הנשענות על גבי עמודים בדלים לאפשרות של כשל פריך בחדירה, במיוחד במצבי עמיסה לא סימטריים ובהעמסות קיצוניות, כגון במקרה של פעולת עומסי הדף עליהם. לכן, מערכת מבנית הכוללת תקרות מקשיות מבטון מזויין יצוקות באתר, הנשענות על גבי מערכת של מסגרות מרחביות משיכות ו/או קירות הקשחה משיכים מבטון מזויין, במיוחד תקרות מקשיות מצולבות, עדיפה במידה רבה על מערכת מבנית הכוללת תקרות צלעות או תקרות ערוגות ועוד יותר, על מערכת הכוללת תקרות חלולות טרומות דרוכות.

לתקרות בטון מזויין מקשיות יצוקות באתר הנשענות על מערכת מסגרות מרחביות משיכות ו/או קירות הקשחה משיכים מבטון מזויין, כמפורט לעיל לעיל, במיוחד תקרות מצולבות, יש יתרון ברור בהשוואה לתקרות צלעות, תקרות ערוגות ובודאי בהשוואה לתקרות חלולות טרומות דרוכות, לא רק מהיבטים של הבטחת פעולת דיאפרגמה אופקית וצמצום הסכנה להתפתחות תהליכי התמוטטות בשרשרת של בניינים אזוריים רגילים, אלא גם מבחינת צמצום החומרה והיקף הנזקים הצפויים להיגרם לבניינים אלה במקרה של פגיעה מלחמתית או פגיעה כתוצאה מאירוע טרור בהם, הן בהיבט של ההתנהגות הכוללת והן במקרה של ההתנהגות המקומית. במקרה האחרון יתרון זה בא לידי ביטוי מיוחד הן במקרים של פגיעה קרובה מאוד והן במקרים של פגיעה ישירה בהם ע"י רש"ק איום ישימים שונים, כמודגם בפרק 4 לעיל. גגות מקשיים מהסוג הנדון של בניינים אזוריים רגילים, אם הם בעלי עובי מספק, יכולים לגרום במקרים רבים לייזום רש"ק איום הפוגעים בהם, כך שפיצוץ הרש"ק מתרחש מחוץ לבניין ולא לאחר חדירתו אל תוך הבניין הנפגע. בכך הם מצמצמים במידה רבה הן את הסיכון להיפגעות אנשים השוהים בבניינים אזוריים בלתי מוגנים רגילים והן את החומרה וההיקף של הנזקים הצפויים להיגרם לבניין הנפגע. על כן, מומלץ בכל מקרה אפשרי ליישם מערכות מבניות מסוג זה, לכל הפחות בגגות של בניינים אזוריים בלתי מוגנים רגילים שעלולים להיות חשופים לפגיעה ישירה של רש"ק איום ישימים שונים, אם לא בכל תקרותיהם. ניתן להשיג את היתרונות המיגוניים הטמונים ברצפות/תקרות/גגות מבטון מזויין מצולבים הנשענים על גבי מערכת מסגרות מרחביות משיכות מבטון מזויין, גם על ידי תכן וביצוע ראויים של מערכות מבניות מהסוג הנדון המשלבות חלקים טרומים או מתועשים עם השלמות יציקת בטון באתר הבנייה. דוגמא אפשרית לכך הן תקרות מרוכבות הכוללות קרומי פח או קרומי בטון מזויין טרומים שמעליהם נוצקת באתר הבנייה שכבת בטון בעובי מתאים, כמודגם בסעיף 5.6.1 לעיל.

מעבר לתכונות יתירות של סוגי תקרות מסוימים מבטון מזויין בכל הנוגע לעמידותם המשופרת בכפיפה גלובלית/לוקלית ובגזירה, חשוב לתת תשומת לב לאירועים קיצוניים בהם התקרה עלולה להתנהג כממברנה התלויה בין סמכים שנותרו על תילם. יש חשיבות רבה להבטחת יכולת התקרה לפעול כממברנה מכוון שהיא מסוגלת לשאת במצב זה כוחות גדולים גם אם זה מלווה בשקיעות גדולות של התקרה. ללא הבטחת אפשרות זו עלולה התקרה להיכשל כחלק מתהליך של התמוטטות בשרשרת. על מנת להבטיח את התנהגות התקרה כממברנה צריך לדאוג, בין היתר, להבטחת יכולת התקרה לשאת כוחות ציריים של מתיחה ובעיקר צריך להבטיח את יכולת הסמכים לשאת כוחות אופקיים הנגרמים כתוצאה מפעולת הממברנה של התקרה.

פרק 6 – מסקנות והמלצות

6.1 מסקנות

כפי שפורט בפרק 2 לעיל, האיומים המלחמתיים ו/או איומי הטרור הישימים למדינת ישראל הינם רבים ומגוונים. כמו כן, למרבה הצער, איומים אלה לא רק שאינם מצטמצמים עם השנים, אלא אף מתגברים. כך צפוי להיות, ככל הנראה, גם בעתיד הנראה לעין. אירועים מלחמתיים שונים שהתרחשו בשנים האחרונות, כגון במלחמת מפרץ הראשונה, במלחמת לבנון השנייה ובמבצע "עופרת יצוקה", המחישו לכל, שכל העורף האזרחי של מדינת ישראל ולא רק ישובים באזורים של "קווי עימות" חשופים לאיומים אלה. אירועים מלחמתיים אלה גרמו אומנם רק למספר קטן יחסית של נפגעים ואבידות בנפש, בין היתר גם לאור היערכות רבת שנים ומתמשכת להבטחת מיגון מתאים לאוכלוסייה האזרחית של המדינה, אך גרמו לנזקים כלכליים ישירים ועקיפים חמורים מאוד לסביבה האזרחית הבנויה בישראל.

ניתוח ביקורתי של האיומים המלחמתיים ושל איומי הטרור הישימים השונים, התקפים כיום, כמו גם ניתוח של הפגיעות שנגרמו כתוצאה מאירועים מלחמתיים שהתרחשו בשנים האחרונות, מצביעים על כך, שפתרונות המיגון עבור האוכלוסייה האזרחית הנהוגים כיום בבנייה האזרחית הרגילה בישראל (מרחבים מוגנים דירתיים, מרחבים מוגנים קומתיים, מרחבים מוגנים מוסדיים), מבטיחים רמת מיגון סבירה יחסית, בהשוואה לבניינים בהם אין פתרון מיגון כלשהו, בפני האיומים הנ"ל התקפים כיום. אולם אין הם מספקים מיגון מוחלט ואינם מבטיחים בהכרח מיגון ראוי בתרחישים מלחמתיים חמורים יותר שעלולים להתפתח בעתיד. כמו כן, פתרונות אלה מיועדים בעיקר לתת רמה של מיגון יחסי לאוכלוסיה ואין כוונתם לצמצם את הנזק הצפוי לתשתית הבנויה כשלעצמה.

אחד העקרונות הבסיסיים של תפישת המיגון המקובלת כיום לגבי האוכלוסייה האזרחית של מדינת ישראל הוא שזמן ההתרעה בפני פגיעה מלחמתית חזויה כיום הינו קצר מאוד. לכן לא ניתן להסתמך על כך שהאזרחים יוכלו להגיע במקרה הצורך מבעוד מועד למקלטים שנבנו בעבר בקומות תחתונות (קומת כניסה או קומה תת קרקעית) של בנייני קומות, או למקלטים ציבוריים שנבנו בעבר מחוץ לבניינים אזרחיים רגילים, בעיקר באזורים אורבאניים וותיקים בהם הבניינים עצמם נבנו קודם לכן ללא מקלטים. כאשר מדובר בפגיעה טרור אשר עלול לסכן בניינים אזרחיים רגילים, כמפורט בפרק 2 לעיל, הבעיה חמורה עוד יותר, מכיוון שבמרבית המקרים אין שום התרעה מוקדמת על כך שאירוע כזה עומד להתרחש. למרות כל המאמצים, הפוליטיים והצבאיים גם יחד, שבם נוקטת המדינה, האיומים המלחמתיים הישימים לגבי העורף האזרחי של מדינת ישראל לא רק שאינם מצטמצמים עם השנים, אלא הם אף מתגברים ועלולים להחמיר עוד יותר בעתיד הנראה לעין. המסקנות העיקריות שניתן להסיק מניתוחי האיומים המלחמתיים העכשוויים והעתידיים גם יחד, בכל הקשור לאיומים הישימים לעורף האזרחי של מדינת ישראל הן כדלהלן:

- עם השנים מתרחבת יריעת האיומים המלחמתיים, הן הקונוונציונליים, בהם דן מחקר זה, והן הבלתי קונוונציונליים. ככל הנראה, מגמה זו תימשך גם בעתיד.
 - עם השנים גדל בהתמדה ארסנל הנשק ובהתאם מחמירה התחזית של כמויות הרש"קים שעלולים להיות משוגרים לאזורים שונים של העורף האזרחי של מדינת ישראל, הן לעבר ישובים שבאזורים של "קווי עימות" והן לעבר ישובים אזרחיים אחרים ברחבי המדינה. בעימותים מלחמתיים אחרונים שוגרו לעבר ישובים אזרחיים בצפון ובדרום הארץ מאות ואף אלפי פגזים, רקטות וטילים מסוגים שונים. מגמת הגדלה משמעותית של כמויות הרש"קים השונים שעלולים להיות משוגרים לעבר ישובים אזרחיים שונים בישראל בעימותים מלחמתיים עתידיים, מחייבת חשיבה וניתוח של מכלול ההיבטים, ובכלל זה בכיוון שהותנע במסגרת מחקר זה.
 - עם השנים גדלות בהתמדה כמויות חומרי הנפץ הכלולים ברש"קי האיום השונים, דבר המגביר מאוד את הסיכון להיפגעות אזרחים השוהים מחוץ או בתוך בניינים אזרחיים רגילים מפגיעת רש"ק בודד, כמו גם הסיכון להיפגעות חמורה של בניינים אזרחיים רבים בעת אירועים מלחמתיים. מגמת הגברת העוצמה ההרסנית החזויה של רש"קי האיום הישימים השונים, כתוצאה מהגדלת כמויות חומר הנפץ בהם, צפויה להימשך גם בעתיד.
 - עם השנים גדלים בהתמדה הטווחים שאליהם ניתן לשגר את רש"קי האיום השונים, ועשוי להשתפר גם דיוק הפגיעה שלהם. מגמה זו של הגדלת הטווחים ושל דיוק הפגיעה מהווים אף הם גורם תורם להחרפת האיום אליו חשופה למעשה כל התשתית הבנויה של מדינת ישראל.
 - ההתפתחויות המתוארות לעיל בכל הקשור להגברת האיומים המלחמתיים השונים מחייבת התאמה מתמדת ופיתוח מתמשך של מדיניות המיגון של האוכלוסייה האזרחית של מדינת ישראל. במסגרת מדיניות המיגון המתעדכנת יש לכלול גם את נושא שדרוג העמידות של התשתיות האזרחיות של מדינת ישראל, על מנת לצמצם את הנזק הכולל, לאפשר עמידות טובה יותר לאורך זמן ולמנוע מגורמים עוינים מלממש מטרותיהם מצד אחד ולאפשר מתן מענה ראוי לאיומים המלחמתיים המשתנים מצד שני.
- המסקנה המתבקשת מההכרה שהאיומים המלחמתיים הישימים על מדינת ישראל גדלים, היא, שמימוש נרחב של האיומים המלחמתיים הללו, ועוד יותר של האיומים החזויים בעתיד, עלול לגרום לא רק לנפגעים ולאבידות רבות בנפש, אלא גם לפגיעה חמורה ובהיקף נרחב בבנייה האזרחית הרגילה ובתשתיות האזרחיות של המדינה. הדבר עלול להכביד על היכולת להתמודד כראוי עם פגיעות אלה, אם לא תינקטנה פעולות שונות שתכליתן לשפר את המיגון ולצמצם את הפגיעות ואת הנזק. בהסתמך על הנתונים והניתוחים המוצגים בדו"ח זה בכל הקשור לעמידות בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים של הבנייה האזרחית הרגילה הנבנית בשיטות בנייה המקובלות בישראל, כמפורט בפרק 3 לעיל (עם דגש מיוחד על בנייני מגורים), ניתן להגיע למסקנות עיקריות שלהלן (ראו גם טבלה 6.1 להלן) ביחס לבניינים אלה:
- לאור ניתוח האיומים המלחמתיים השונים והמסקנות שניתן להסיק מניתוחים אלה, כמפורט לעיל, ניתן להגיע למסקנה שבניינים אזרחיים בלתי מוגנים רבים וביניהם בנייני

מגורים רבים בכל רחבי המדינה ובמיוחד באזורים הסמוכים ל"קווי עימות" עלולים להיות חשופים לפגיעות קרובות ואף לפגיעות ישירות של רש"קי האיום השונים, על כל המשתמע מכך.

- העמידות של בניינים הבנויים בשיטות "בנייה קלה" הינה מוגבלת מאוד בפני כל האיומים המלחמתיים הישימים. בניינים כאלה, לרבות בנייני מגורים, עלולים להינזק קשה ואף להיהרס כליל, לא רק כתוצאה מפגיעה ישירה או קרובה של רש"קים כבדים הנושאים עשרות או מאות קילוגרמים של חומרי נפץ, אלא גם כתוצאה מפגיעה ישירה של רש"קים קלים למדי, הנושאים כמויות קטנות של מספר מועט של קילוגרמים של חומרי נפץ. שהיית אזרחים בבניינים מסוג זה בעת פגיעה בהם, במיוחד בבניינים ישנים יותר שאינם כוללים מרחבים מוגנים או חדרי ביטחון, עלולה להסתיים בפגיעה חמורה ואף באבידות בנפש במקרה של פגיעה ישירה או קרובה בהם, לא רק כתוצאה מהיפגעות ישירה של האזרחים על ידי הדף ו/או רסס, אלא גם כתוצאה מהיפגעותם כתוצאה מתהליכי הכשל/ההתמוטטות של הבניינים הנ"ל, שעלולים להתרחש כתוצאה מפגיעה מלחמתית או מפגיעת טרור בהם.
- עמידות של בניינים לא שלודים, הכוללים קירות בני נושאים בפני חלק בלתי מבוטל של האיומים המלחמתיים הישימים הינה מוגבלת. בניינים מסוג זה נבנו בעיקר בעבר עוד לפני קום המדינה. בחלק גדול מהם לא קיים מקלט, או חדר ביטחון, או מרחב מוגן, היכולים בתנאים מסוימים להבטיח מיגון יחסי בפני האיומים הנ"ל לאוכלוסייה האזרחית המאכלסת אותם. בנוסף לעמידות מוגבלת מאוד בפני הדף ורסס, גם העמידות הסיסמית של בניינים ישנים אלה הינה במקרים רבים מוגבלת ובלתי מספקת. למרות העובדה שבניינים אלה הינם לרוב בני מספר קומות מוגבל (4-1 קומות), הסיכון להתפתחות תהליכי כשל כולל - כשל בשרשרת שלהם, כתוצאה מהיפגעותם המקומית האפשרית הינו משמעותי מאוד, זאת מכיוון שהם אינם כוללים מערכת מבנית שלודה היכולה להתמודד עם תופעות אלה. הדבר מגביר מאוד את הסיכון להיפגעות האוכלוסייה האזרחית המאכלסת אותם בעת אירועים מלחמתיים, אירועי טרור או רעידת אדמה חזקה.
- העמידות בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים של בניינים שלודים מבטון מזויין הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות, הכוללים מעטפת חיצונית ומחיצות פנימיות מבלוקי בני המקובלים בישראל (בלוקי בטון חלולים ו/או בלוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלב), הינה במרבית המקרים טובה במידה ניכרת מזו של בניינים לא שלודים המוזכרים לעיל. הדבר נכון לגבי בניינים ישנים שאינם כוללים פירי מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות/מחוזקים מבטון מזויין ונכון במיוחד לגבי בניינים חדשים יותר הכוללים פירים כאלה. יחד עם זאת יש לציין שגם בניינים מסוג זה עלולים להיפגע קשה ואף להיהרס, לכל הפחות באופן חלקי, כתוצאה מפגיעה קרובה מאוד או פגיעה ישירה בהם על ידי רש"ק איום כבד. כאן המקום לציין כי בניינים שלודים מבטון מזויין הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות ואשר כוללים גגות קלים עלולים להינזק הרבה יותר קשה מבניינים דומים בעלי גגות קשיחים מבטון מזויין, בהשפעת איומים מלחמתיים דומים. במקרה של בניינים הכוללים פירי מרחבים מוגנים המשולבים בהם (להבדיל מפירים שהוספו בשלב מאוחר יותר לבניין הקיים), הימצאות הפירים הללו עשויה לתרום מאד ליציבות הכוללת של המבנה

ולמניעת ההתמוטטות בשרשרת שלו. יש לציין שבשלב זה של המחקר מדובר באבחנות כלליות ובהכללות המחייבות המשך בחינה וניתוח פרטני יותר. כך למשל, מערכת שלד המבוססת על עמודים ותקרות מקשיות או תקרות ערוגות ללא קורות רגישה הרבה יותר לאפשרות של התפתחות תהליכי כשל ולהתמוטטות בשרשרת, בהשוואה למערכת המבוססת על מסגרות משיכות מבטון מזויין. מערכת הכוללת תקרות מקשיות מבטון מזויין, במיוחד תקרות מקשיות מצולבות, עדיפה במידה רבה על מערכת הכוללת תקרות צלעות ועוד יותר על מערכת הכוללת תקרות חלולות טרומות דרוכות שהן רגישות ופגיעות באופן מיוחד..

- העמידות בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים של בניינים טרומים, הכוללים ספיני קירות מבטון מזויין הן במעטפת החיצונית שלהם והן בקירות/מחיצות פנימיות, וטבלות תקרה טרומות מבטון מזויין או בטון דרוך, תלויה במידה רבה באופי המחברים בין הרכיבים הטרומים השונים. בניינים טרומים ישנים שנבנו לפני אימוץ בתקינה הישראלית של כללי תכן המיועדים לצמצם את הסיכון להתפתחות תהליכי כשל בשרשרת ו/או בניינים טרומים ישנים שאינם כוללים פירים של מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים עלולים להיות רגישים במיוחד לפגיעה קרובה מאוד של רש"קי איום כבדים או לפגיעה ישירה של מגוון רחב של רשק"ים ישימים.

- קירות בני מבוקי בטון חלולים או מבוקי בטון תאי מאושפרים באוטוקלב של המעטפת החיצונית של בניינים הבנויים בשיטות בנייה קונוונציונליות כמוזכר לעיל וכן גם מחיצות הבני הפנימיות בהם, רגישים במיוחד להיפגעות חמורה כתוצאה ממימוש איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים. קירות בני מסוג זה עלולים להיהרס כתוצאה מהדף הפיצוץ, גם כאשר המרחק המקונם של מוקד הפיצוץ הוא גדול יחסית. הרס קירות אלה עלול לסכן את האנשים המאכלסים את הבניינים הנדונים, כתוצאה מהעפת רגמות הנוצרות תוך כדי ההרס שלהם, וכן עקב דליפת לחצי הדף משמעותיים לחללים פנימיים של בניינים אלה. סיכון זה משמעותי במיוחד בבניינים ישנים שאינם כוללים פירי מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים. בנוסף לכל אלה, העמידות בפני חדירת רסיסים הנוצרים כתוצאה מפיצוץ רש"קי האיום הישימים השונים של קירות בני מהסוגים הנדונים הינה מוגבלת למדי. הדבר מהווה סיכון נוסף להיפגעות אנשים המאכלסים בניינים בלתי מוגנים הכוללים מעטפות חיצוניות של קירות בני.

- העמידות בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים של גגות קלים מקונסטרוקציית פלדה/עץ המקורים ברעפים מסוגים שונים (רעפי חרס או רעפי בטון), או בקירויים דקים וקלים אחרים, הינה מוגבלת מאוד. במיוחד רגישים גגות מסוג זה לפגיעות ישירות, אף אם מדובר בפגיעה ישירה של רש"קים קלים בלבד, הנושאים רק כמות קטנה של חומרי נפץ. במקרה של פגיעה ישירה בגגות מסוג זה הרש"ק הפוגע עלול לחדור אל תוך החלל הפנימי של הבניין הנפגע בטרם התפוצצותו. התפוצצות רש"ק כזה בחלל הפנימי של הבניין הנפגע עלולה להיות קטלנית לאנשים המאכלסים בניין כזה, במיוחד אם הוא בניין ישן יחסית שאינו כולל מרחבים מוגנים ו/או חדר מדרגות מחוזק/ביטחוני. כמו כן, פיצוץ פנימי בתוך בניין אזרחי בלתי מוגן רגיל, כגון בניין מגורים, אף של כמות קטנה יחסית של חומר נפץ, עלול לגרום להרס מקומי של חלקי הבניין הסמוכים למוקד הפיצוץ ובתנאים מסוימים אף להתפתחות

תהליך כולל של כשל בשרשרת של הבניין הנפגע. הדבר מהווה סיכון משמעותי נוסף לאנשים המאכלסים בניינים מסוג זה. בהקשר לגגות קלים מהסוג הנדון מן הראוי לציין שהם מיושמים בהרחבה באזורים שונים בישראל, לא רק בבניינים הבנויים בשיטות שונות של "בנייה קלה", כמוזכר לעיל, אלא גם בבניינים שלודים, במיוחד בבניינים נמוכים חד או דו-קומתיים המקובלים מאוד באזורים כפריים או בפרברי ערים. כמו כן, גגות כאלה נבנים לעיתים גם בבנייני קומות המיועדים למגורים באזורים הרריים ברחבי המדינה, כגון בחיפה, ירושלים, טבריה, צפת וכו'.

- העמידות בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים של חלונות מזוגגים של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים הינה מוגבלת מאוד. הזיגוג של חלונות המשולבים במעטפת החיצונית של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, או של קירות מסך של בניינים אלה העשויים מזכוכית, צפוי להתרסק כתוצאה מפיצוץ, אף אם מוקד הפיצוץ הינו רחוק למדי. ניפוץ הזיגוג גורם ליצירת רסיסי זכוכית חדים רבים מאוד שחלקם מועפים במהירות גדולה לחללים פנימיים של הבניינים הנפגעים. רסיסי זכוכית אלה, המכונים רסס משני, מהווים סיכון חמור, היכול להיות אף קטלני, לאנשים המאכלסים בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, במיוחד בניינים ישנים שאינם כוללים מרחבים מוגנים.
- תקרות מקשיות מבטון מזויין יצוק באתר, במיוחד תקרות מקשיות מצולבות הנשענות על מערכת קורות המהוות חלק אינטגרלי של מערכת מסגרתית משיכה, הינן בעלות עמידות משופרת בפני מכלול ההשפעות של האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים השונים, בהשוואה לתקרות צלעות או לתקרות טרומות מבטון דרוך, כדוגמת תקרות לוח"דים. הדבר נכון באופן עקרוני בכל הקשור לתגובה המקומית שלהן לפגיעה ולחומרת הנזק הצפוי להיגרם להן כתוצאה של הפגיעה בהן, כמו גם בכל הקשור ליכולת התפקוד שלהן כדיאפראגמה אופקית המקשרת בין הרכיבים המבניים השונים של בניינים אזרחיים בלתי מוגנים רגילים, לא רק במצב שרות רגיל, אלא גם במהלך ולאחר היפגעותם האפשרית.
- עמודים בדלים מבטון מזויין של בנייני קומות, כגון עמודים בקומות עמודים פתוחות של בנייני קומות המיועדים למגורים, המקובלים מאוד בישראל, במיוחד עמודים בעלי מידות חתך קטנות יחסית האופייניות לבניינים בעלי מספר קומות מוגבל (2-5 קומות), רגישים למדי לפגיעה ישירה או פגיעה קרובה מאוד בהם. הרס מקומי של עמוד כזה כתוצאה מפיצוץ (או מסיבה אחרת כלשהי) עלול, בתנאים מסוימים, לגרום להתפתחות תהליכי הרס נרחב של חלקים רבים של הבניין הנפגע ואף לכשל כללי בשרשרת של הבניין. סיכון זה משמעותי במיוחד בבניינים ישנים יחסית שאינם כוללים פירי מרחבים מוגנים ו/או חדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים. התפתחות אפשרית של תהליכי כשל בשרשרת של בניינים עלולה לגרום לנפגעים רבים ולאבידות רבות בין האנשים המאכלסים בניינים אלה.
- קיימת חשיבות רבה לתכנון ולתכן של בניינים אזרחיים רגילים, לרבות בנייני מגורים, הנבנים בישראל, תוך התחשבות מושכלת באיומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים, הן ברמת התכנון האורבאני הכללי (קביעת אופן ההעמדה של הבניינים, המרחקים ביניהם וכו'), הן ברמת התכן האדריכלי וההנדסי הכללי (קביעת צורת הבניין, גודלו, המערכת המבנית שלו, סוגי חומרי הבנייה של השלד ושל המעטפת החיצונית, מיקום וגודל הפתחים

במעטפת החיצונית וכו'), והן ברמת התכן המפורט שלהם, על רכיביהם השונים. הדבר עשוי לשפר במידה ניכרת את העמידות של בניינים אזרחיים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים ולצמצם במידה ניכרת את היקפי הפגיעה החזויה באזרחים המאכלסים בניינים אלה במקרה של מימוש איום מלחמתי או איום טרור כלשהו. כמו כן, עשוי הדבר לצמצם במידה ניכרת את היקפי הנזקים הכלכליים הישירים והעקיפים שעלולים להיגרם לבניינים אזרחיים רגילים ברחבי מדינת ישראל, כתוצאה ממימוש איום מלחמתי או איום טרור כלשהו. בהקשר זה מן הראוי לציין שחלק מהאמצעים שניתן לנקוט בהם כנ"ל, עשוי לשפר במידה רבה גם את העמידות הסיסמית של הבניינים הנדונים ולהשיג בכך תוצאה סינרגטית של עמידות כוללת משופרת של הבנייה האזרחית בישראל בפני מכלול רחב של השפעות הרסניות אפשריות, תוך ניצול מושכל של משאבים כלכליים שניתן להעמיד לצורך השגת המטרות הנ"ל, שמטבע הדברים הם תמיד מוגבלים.

טבלה מס' 6.1 : סיכום עיקרי המסקנות ביחס לשיפור העמידות המיגונית של בניינים אזרחיים רגילים

מס'	מסקנה/המלצה	מידת התרומה של יישום המסקנה/ההמלצה
1	התחשבות באיומים מלחמתיים ובאיומי טרור ישימים בתכן אורבאני (אופן העמדת הבניינים, מרחקים בין בניינים, רוחב הרחובות, ניצול מכשולים טבעיים ומלאכותיים לשיפור המיגון של הבניינים וכו').	בינונית
2	התחשבות באיומים מלחמתיים ובאיומי טרור ישימים בתכן האדריכלי של בניינים (צורת הבניין, סדירות מבנית, סוגי חומרי הבנייה של מעטפות הבניינים, מיקום וגודל הפתחים במעטפות הבניינים, שילוב אמצעי מיגון פתחים, שימוש במעטפות כפולות וכו').	משמעותית
3	התחשבות באיומים מלחמתיים ובאיומי טרור ישימים בתכן ההנדסי של בניינים (בחירת הערכות מבניות בעלות תכונות דינמיות משופרות, הבטחת משיכות ודרגת אי סיום גבוהה של מערכות מבניות, הבטחת מחברים משיכים בין רכיבים מבניים שונים, תכן המבטיח צמצום הסכנה להתמוטטות בשרשרת של בניינים במקרים של פגיעה חמורה בהם, העדפת מעטפות חיצוניות קשיחות בהשוואה למעטפות חיצוניות קלות ו/או פריכות, שימוש במעטפות חיצוניות כפולות, תכן סינרגטי להבטחת עמידות סיסמית ועמידות מיגונית של בניינים, תכן מערכות מבניות הניתנות לשדרוג הדרגתי על פי הצורך – שדרוג מיגוני ושדרוג סיסמי, וכו').	משמעותית

6.2 המלצות

בהתבסס על ממצאי השלב הנוכחי של מחקר זה והמסקנות המוצגות בסעיף 6.1 לעיל ניתן להמליץ בשלב זה על פעילויות שונות המכוונות לשיפור העמידות של בניינים אזרחיים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים, כדלהלן:

- מומלץ להתחשב בשלבי התכנון והתכן של בניינים אזרחיים רגילים חדשים, לרבות בנייני מגורים, במכלול האיומים המלחמתיים ואיומי הטרור הישימים לגביהם, תוך התחשבות במיקומם הגיאוגרפי של הבניינים הנ"ל. על מנת לאפשר זאת באופן מושכל, יש מקום לפעילויות שונות (הרצאות, ימי עיון, קורסים) המכוונות להעלאת המודעות של מתכננים (האדריכלים ומהנדסי מבנים) לאיומים הנ"ל. כמו כן, יש מקום לשקול שילוב של יעוץ מיגון בעל ידע מתאים בסוגיות הנדונות בצוות התכנון של פרויקטים גדולים ו/או מיוחדים של בנייה אזרחית רגילה, החל משלבי התכנון הראשוניים של פרויקטים אלה.
- מומלץ להימנע משימוש בחומרי בנייה ו/או ברכיבי בנייה שאינם עמידים, לפחות ברמה מסוימת שיש לקבוע אותה מראש, בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים, לצורך בניית בניינים אזרחיים רגילים, כגון בנייני מגורים.
- מומלץ לבחון בכובד ראש במהלך התכן של בניינים אזרחיים רגילים אפשרויות של שימוש בחומרי בנייה, רכיבי בנייה ושיטות בנייה בעלי עמידות משופרת בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים. ראוי שבחינה כזו תבוצע לא רק על בסיס השוואת מחירים פשטנית בין האפשרויות הנבחנות השונות, אלא בהתבסס על ניתוחים כלכליים-הנדסיים המתחשבים לא רק בעלויות הישירות של הבנייה, אלא גם בעלות החזויה של הנזקים הכלכליים הישירים והעקיפים שעלולים להיגרם כתוצאה מההפגעות אפשריות של בניינים אלה באירועים מלחמתיים או באירועי טרור חזויים. יש מקום לנקוט צעדים אלה במיוחד בפרויקטי בנייה גדולים, לרבות בפרויקטים של בניית שכונות מגורים חדשות ו/או בפרויקטי בנייה של בניינים עתירי גובה שמספרם הולך וגדל בישראל.
- במהלך התכן המפורט של בניינים אזרחיים רגילים, לרבות בנייני מגורים, מומלץ לבחון את מידת עמידותם החזויה מצבים קיצוניים של ההפגעות האפשריות כתוצאה של מימוש איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים, או כתוצאה של רעידת אדמה חזקה, הן ברמה מקומית והן ברמה הכוללת, זאת בנוסף להבטחת עמידותם במכלול העומסים החזויים לפעול עליהם במצבים גבוליים של שרות ושל הרס, על פי דרישות התקנים הישראליים ישימים השונים. בחינות אלה מיועדות להוכיח שבבניינים הנ"ל לא יתפתחו תהליכי כשל כולל בשרשרת, גם במקרים של פגיעה מקומית חמורה בהם. ניתן להשיג זאת על ידי הכללת אמצעים מתאימים שונים במערכת המבנית שלהם, כמפורט בפרק 5 לעיל.
- בכל הקשור לבנייה אזרחית קיימת, במיוחד כזו שאינה כוללת מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים, מומלץ לקבוע סדרי עדיפויות לביצוע פעולות המכוונות לשיפור המיגון שלהם בפני איומים מלחמתיים ישימים שונים, בתלות במיקומם הגיאוגרפי של בניינים אלה, יחד עם קביעת סדרי עדיפויות לשדרוגם הסיסמי, במידת הצורך. ראוי שקביעת סדרי עדיפויות בנדון תעשה על ידי גורמים ממלכתיים מוסמכים, תוך התייעצות ושיתוף פעולה עם גורמים מקצועיים העוסקים בסוגיות הנדונות.
- מומלץ שפיקוד העורף ימשיך בפעילויות המכוונות לעידוד גורמים שונים הקשורים לתעשיית הבנייה לפתח חומרי בנייה ומוצרי בנייה חדשים בעלי תכונות משופרות למיגון מבחינה מיגונית, שאינם יקרים יתר על המידה, המיועדים לשימוש בבנייה אזרחית רגילה, תוך כדי

בחינתם האובייקטיבית של החומרים והמוצרים החדשים המוצעים, על ידי גורמי בחינה מוסמכים.

- מומלץ להמשיך בפעילויות מחקר שונות המיועדות לפתח חומרי בנייה, שיטות בנייה, שיטות חישוב ושיטות תכן חדישות, המכוונות לשיפור העמידות של בניינים אזרחיים רגילים, לרבות בנייני מגורים, בהשפעת מכלול רחב של איומים מלחמתיים ואיומי טרור ישימים שונים, ולצמצום היקפי הנזק החזויים כתוצאה מהיפגעות אפשרית של בניינים מהסוג הנדון כתוצאה מממוש אפשרי של איומים אלה. בין היתר, יש מקום לפעילות מחקרית עיונית וניסויית ארוכת טווח ומתמשכת בנושאים רבים, כמו לדוגמא:

- המשך הפעילות המחקרית המכוונת לפיתוח של בטונים עתירי חוזק הניתנים ליישום מעשי בבנייה אזרחית רגילה, לרבות פיתוח דור חדש של בטונים עתירי חוזק איכותיים במידה משמעותית מאלה הקיימים כיום (בטונים מסוג ב-150, ב-200).

- המשך הפעילות המחקרית המכוונת לשיפור העמידות של קירות בני בפני עומסים קיצוניים, הן עומסים הפועלים במישורם והן עומסים הפועלים בניצב למישורם. פעילות מחקרית זו נחוצה לאור העובדה שבישראל קיים שימוש נרחב בקירות בני בבנייה אזרחית רגילה. הפתרונות השונים הקיימים כיום, המכוונים לשיפור העמידות של קירות בני בפני עומסי הדף ו/או עומסים סיסמיים אינם מספקים במקרים רבים, לא רק מבחינת מידת השיפור שניתן להשיג בהתנהגות החזויה של הקירות הנדונים כשהם חשופים לעומסים הנ"ל, אלא גם מבחינת דרישות תפקודיות חשובות שונות שיש להתחשב בהן בבנייה אזרחית רגילה, כמו גם מבחינת עלותם.

- המשך פעילות מחקרית בסוגיות הקשורות לגיבוש אמצעים, לרבות שיטות תכן, המיועדים לצמצם את הסכנה להתפתחות תהליכי כשל בשרשרת של בניינים אזרחיים רגילים, כתוצאה מהיפגעותם מסיבה כלשהי, לרבות היפגעותם האפשרית כתוצאה מאירועים מלחמתיים ו/או מאירועי טרור חזויים שונים.

- פעילות מחקרית המיועדת לגבש כלי הערכה כלכליים-הנדסיים המבוססים על שיקולי עלות-תועלת, לצורך בחינת פתרונות אפשריים שונים לשיפור העמידות של בניינים אזרחיים רגילים בפני איומים מלחמתיים ו/או איומי טרור ישימים שונים, במקביל לבחינת כאלה בהקשר להבטחת עמידותם הסיסמית הראויה של בניינים אלה.

- פעילות מחקרית המיועדת לבחינת עמידות בנייה קיימת ולשדרוגה היעיל לאור האמור לעיל.

- פעילות מחקרית המיועדת לבחון לעומק רעיונות שונים לשיפור אפשרי של העמידות המיגונית של בניינים אזרחיים רגילים, תוך שימוש במעטפות בנייה כפולות קשיות וגמישות גם יחד.

חלק מפעילויות מחקריות מוצעות אלה אמור להיות עיוני וחלקן האחר ניסויי. הפעילות המחקרית הניסויית אמורה לכלול הן ניסויים מעבדתיים והן ניסויי פיצוץ בקנה מידה מוקטן ו/או בקנה מידה מלא.

רשימת מקורות

- [1] חוק ההתגוננות האזרחית, תש"א - 1951 ;
- [2] קובץ תקנות 2433 - תקנות ההתגוננות האזרחית (מפרטים לבניית מקלטים), התכ"ט - 1968 ;
- [3] קובץ תקנות 5289 - תקנות ההתגוננות האזרחית (מפרטים לבניית מקלטים), התש"ן - 1990 ;
- [4] קובץ תקנות 5425 - תקנות ההתגוננות האזרחית (מפרטים לבניית מקלטים) (תיקון), התשנ"ב - 1992 ;
- [5] קובץ תקנות 5606 - תקנות ההתגוננות האזרחית (מפרטים לבניית מקלטים) (תיקון), התשנ"ד - 1994 ;
- [6] תקנות ההתגוננות האזרחית (מפרטים לבניית מקלטים) (תיקון), התשנ"ח - 1998 ;
- [7] חוק התכנון והבנייה, התשכ"ה - 1965 ;
- [8] תקנות התכנון והבנייה (בקשה להיתר, תנאים ואגרות), התש"ל - 1970 ;
- [9] ד. ינקלבסקי, ס. שוורץ, י. קרינסקי: שילוב מרחבים מוגנים במבני קומות לשיפור עמידותם ברעידות אדמה ובאיומים מלחמתיים – שלב א' – חלק I; המכון הלאומי לחקר הבנייה – טכניון, 2005 ;
- [10] ד. ינקלבסקי, ס. שוורץ: שילוב מרחבים מוגנים במבני קומות לשיפור עמידותם ברעידות אדמה ובאיומים מלחמתיים – שלב א' – חלק II – הצעה להנחיות מוקדמות לתכן שלד של מבני קומות הכוללים פירי מרחבים מוגנים וחדרי מדרגות מחוזקים/ביטחוניים; המכון הלאומי לחקר הבנייה – טכניון, 2005 ;
- [11] ו. יאגוסט, ד. ינקלבסקי, א. דנציגר, ס. שוורץ, י. קרינסקי: עמידות מבנה מגורים בפני רעידות אדמה: מאפייני פגיעה חמורה במבנים ודרכי ההתמודדות – שלב א'; המכון הלאומי לחקר הבנייה – טכניון, 2005 ;
- [12] א. חנינה: פגיעות רק"ק בגליל המערבי – 2006. 30.7-13.8; דו"ח סיכום הנדסי; מפקדת פיקוד העורף – 2006 (דו"ח מסווג – "שמור") ;
- [13] א. חנינה: פגיעות בעורף במהלך "עופרת יצוקה" 18/1/2009 - 27/12/2008; דו"ח סיכום הנדסי; מפקדת פיקוד העורף – 2009 (דו"ח מסווג – "שמור") ;
- [14] מדריך לתכנון מבנים מוגנים – כרך א'; מקהנ"ר/ענף ביצורים, 1987 ;
- [15] FEMA 459: Incremental Protection of Commercial Buildings from Terrorist Attack; Federal Emergency Management Agency, 2008;
- [16] TM-5-855: Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons; USA WES/SS-R, 1992;
- [17] Henrych, J.: The Dynamics of Explosion and its Use; Academia, Prague, 1979;
- [18] Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., Strehlow, R. A.: Explosion Hazards and Evaluation; Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1983;

- [19] Bangash, M. Y. H.: Impact and Explosion – Analysis and Design; Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1993;
- [20] UFC 3-340-02: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions; Department of Defense – USA, 2008;
- [21] UFC 4-010-01: DoD Minimum Antiterrorism Standards for Buildings; USACOE – Protective Design Center, 2007;
- [22] FEMA 426: Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings; Federal Emergency Management Agency, 2003;
- [23] Lie, T.T.: "Structural Fire protection" ASCE Manual of Practice, No. 78, American Society of Civil Engineers, New York, 1992;
- [24] SFPE: "SFPE Engineering Guide to Performance Based Fire Protection Analysis and Design of Buildings", Society of Fire Protection Engineers, 2000;
- [25] Kodur, V.K.R., Harmathy, T.Z.: "Properties of Building Materials", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2002;
- [26] ד. ינקלובסקי, ס. שוורץ, י. אופיר, א. ליבוביץ: הכנת תרחישי נזק ריאליים ונתונים לקבלת החלטות באירועי רעידת אדמה חזקה – שלב א' – חלק 1; המכון הלאומי לחקר הבנייה – טכניון, 2009;
- [27] "חוקת הבטון" – הוראות לשימוש בבטון מזויין בבניינים; עריית תל אביב – מחלקת הנדסה, 1946;
- [28] תקן ישראלי ת"י 466 (1962): "חוקת הבטון: חלק א' – עקרונות כלליים"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1962;
- [29] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 1 (1975): "חוקת הבטון: עקרונות"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1975;
- [30] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 1 (1987): "חוקת הבטון: עקרונות"; מכון התקנים הישראלי, 1987;
- [31] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 1, גיליון תיקון מס' 1 (1998): "חוקת הבטון: עקרונות"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1998;
- [32] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 1 (2003): "חוקת הבטון: עקרונות כלליים"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 2003;
- [33] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 1, גיליון תיקון מס' 1 (2005): "חוקת הבטון: עקרונות כלליים"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 2005;
- [34] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 1, גיליון תיקון מס' 2 (2009): "חוקת הבטון: עקרונות כלליים"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 2003;
- [35] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 2 (1964): "חוקת הבטון: אלמנטים ומעורות של בטון מזויין ושל בטון לא מזויין"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1964;

- [36] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 2 (1979): "חוקת הבטון: אלמנטים ומערכות של בטון מזוין ושל בטון לא מזוין"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1979;
- [37] תקן ישראלי ת"י 466 - חלק 2, גיליון תיקון 1-3, מהדורה משולבת (1996): "חוקת הבטון: אלמנטים ומערכות של בטון מזוין ושל בטון לא מזוין"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1996;
- [38] "טיפוסי אב 4-1962"; שיכון ובנייה, יחידת הסטנדרטים – תכנון והנדסה, משרד השיכון, מדינת ישראל, 1965;
- [39] ש. אטינגן: מדריך לאינג'ינר – בנאות - כרכים א'-ג'; הוצאת מסדה, תל אביב, 1954-1970;
- [40] תקן ישראלי ת"י 940 (1978): "ביסוס מבנים"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1978;
- [41] תקן ישראלי ת"י 940 – חלק 1 (2008): "תכן גאוטכני: גאוטכניקה וביסוס בהנדסה אזרחית"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 2008;
- [42] תקן ישראלי ת"י 413 – כולל גיליונות תיקון 1÷3 (2009): "תכן עמידות מבנים ברעידות אדמה"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 2009;
- [43] "תקן לבנייה קשיחה ולחדרי ביטחון"; מפקדת קצין הנדסה ראשי – מחלקת תח"ן, 1978;
- [44] "חוק התכנון והבנייה – התשכ"ה (1965)"; ספר החוקים 467, המדפיס הממשלתי, ירושלים, 1965;
- [45] תקן ישראלי ת"י 71 (1953): "מקלטים תת-קרקעיים בסלע"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1953;
- [46] תקן ישראלי ת"י 73 (1953): "מקלטים על-קרקעיים"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1953;
- [47] תקן ישראלי ת"י 76 (1953): "מוספים לתקנים בשביל מקלטים בפני התקפות אוויר"; מכון התקנים הישראלי, תל אביב, 1953;
- [48] א. רצון: מקלט ומחסה – בנייה ביטחונית; מערכות, תל אביב, 1963;
- [49] מ. איתן, ר. איתן: מדריך לתכנון וביצוע מרחבים מוגנים; מפקדת פיקוד העורף – מחלקת התגוננות אוכלוסייה, 2001;
- [50] ארטישצ'ב ו. : "הערכה ראשונית של עמידות מבני קומות טרומים קיימים ברעידות אדמה – שלב א'", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2003.
- [51] חנינה א. : "פגיעות רק"ק בגליל המערבי – 30 ליולי עד 13 לאוגוסט 2006 – דו"ח סיכום הנדסי", מפקדת פיקוד העורף, 2006 (דו"ח "שמור");
- [52] חנינה א. : "פגיעות בעורף במהלך 'עופרת יצוקה' – דו"ח סיכום הנדסי", מפקדת פיקוד העורף, 2009 (דו"ח "שמור");
- [53] שוורץ ס., הנאור א., ינקלבסקי ד. : "עמידות בעומסים אופקיים של מסגרות בטון מזוין הכוללים מילוי של ספיני קירות בני", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2008;
- [54] יאגוסט ו., ינקלבסקי ד., דנציגר א., שוורץ ס., קרינסקי י. : "עמידות מבנה מגורים בפני רעידות אדמה: מאפייני פגיעה חמורה במבנים ודרכי התמודדות – שלב א'", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2005;

- [55] Starossek U.: "Typology of Progressive Collapse", Engineering Structures, Vol. 29, No. 9, September 2007, pp. 2302-2307;
- [56] פרוסטיג י., שוורץ ס., הנאור א.: "התמוטטות אולם שמחות "וורסאי" – אזור תעשייה תלפיות – ירושלים, דו"ח ועדת החקירה ההנדסית, חלק א' ו- ב' ", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2001 ;
- [57] AUTODYN-3D – Ver.11.0: "Explicit Software for Non-Linear Dynamics", Century Dynamics Inc., 2008;
- [58] Smith P.D., Rose T.A.: "Blast Wave Propagation in City Streets – an Overview", Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 8, No. 1, 2006, pp.16-28;
- [59] Smith P.D., Rose T.A., Green J.A.: "The Effect of Arrays of Suburban Buildings in Providing Shielding from Blast", Proceedings of the 11th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Germany, May 2003;
- [60] Gebbeken N., Döge, T.: "Explosion Protection – Architectural Design, Urban Planning and Landscape Planning", International Journal of Protective Structures, Vol. 1, No. 1, 2010;
- [61] כץ א., דנציגר א., בנטור א.ת. לויתן א.: "בטונים בעלי חוזק גבוה – משלב א' – חלק ב', תכונות בטונים מאגרגטים מקומיים", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2007 ;
- [62] דנציגר א., סביר צ.: "חקר ההתנהגות הסטטית וגיבוש קוים מנחים לתכן סטטי של רכיבי מבנים מוגנים מבטון בעל חוזק גבוה הכולל סיבים", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2004 ;
- [63] כץ א., דנציגר א., וכסלר א.: "חקר ההתנהגות הסטטית וגיבוש קוים מנחים לתכן סטטי של רכיבי מבנים מוגנים מבטון בעל חוזק גבוה הכולל סיבים – הידבקות ועיגון", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2006 ;
- [64] Dancigier A.N., Yankelevsky D.Z., Jaegermann Ch.: "Response of High Performance Concrete Plates to Impact of Non-deforming Projectiles", International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, 2007, pp. 1768-1779;
- [65] הנאור א., רוטנברג א.: "פירים מרוכבים כמערכת הקשחה בבניינים גבוהים עם שלד פלדה – חלק I – סקר ספרות", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 1998 ;
- [66] הנאור א., רוטנברג א.: "פירים מרוכבים כמערכת הקשחה בבניינים גבוהים עם שלד פלדה – שלב א' – רקע", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 1999 ;
- [67] רבינוביץ ע., פרוסטיג י.: "חיזוק ותיקון מבני בטון מזויין באמצעות חומרים מרוכבים", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2000 ;

- [68] כץ א.: "חיזוק מבני בטון באמצעות הדבקת יריעות FRP: איכות פני הבטון", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2003;
- [69] רבינוביץ ע., מאמד א.: "משיכות ברכיבי בטון מזויין משודרגים באמצעות חומרים מרוכבים", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2004;
- [70] Dietmar C.: "Retrofit Measurements for Masonry Walls: Effectiveness of Different Approaches", Proceedings of the 11th International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Mannheim, Germany, May 2003;
- [71] Myers J.J., Bekarbi A., El-Domiaty K.A.: "Blast Resistance of FRP Retrofitted Un-Reinforced (URM) Walls With and Without Arching Action", TMS Journal, August 2004, pp. 9-26;
- [72] Baylot J.T., Bullock B., Slawson T.R., Woodson S.C.: "Blast Response of Lightly Attached Concrete Masonry Unit Walls", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 8, 2004, pp. 1186-1193;
- [73] Davidson J.S., Fisher J.W., Hammons M.I., Porter J.R., Dinan R.J.: Failure Mechanisms of Polymer-Reinforced Masonry Walls Subjected to Blast", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 131, No. 8, 2004, pp. 1194-1205;
- [74] חאמד א., רבינוביץ ע.: "קירות בני מחוזקים לכפיפה חד כונית מחוץ למישור באמצעות חומרים מרוכבים – צורות כשל", המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, 2007;

Synopsis

The present research is the first stage of a long term research and development program, aimed at checking different possibilities for improving the resistance of ordinary civilian buildings typically built in Israel, especially residential buildings, against various relevant war and terror threats. Due to its unrestricted nature, this research report doesn't contain restricted information and data, related to these threats.

Chapter 1 of this research report includes a general overview of the basic issues related to the various war and terror threats that Israel is facing for many years, since its establishment in 1948, including their effect on the civilian population and on the built-up environment of Israel. In addition, the main aims of the present stage of this research program and the utilized research methods are also detailed in Chapter 1.

Chapter 2 of the report presents the relevant war and/or terror threats, Israel is facing, together with general description of the main effects of the various war and terror threats. Possible developments related to the different war threats Israel might face in the future are also discussed in this chapter.

Chapter 3 of this research report presents a detailed historical overview of the development of the building industry in Israel during the 20th century, before and after the establishment of Israel, including issues related to gradual development of building laws, by-laws, codes of practice and standards, especially those related to residential buildings and to protection of the civilian population of Israel against various war threats. Relevant basic data related to building materials, construction methods and structural systems used usually in residential buildings are also included in Chapter 3.

Chapter 4 of the report contains information regarding the expected response of ordinary non protected civilian buildings to various effects of the relevant war and/or terror threats, including blast, fragmentation, penetration, etc. Several examples of ordinary non protected civilian buildings, especially residential buildings, affected seriously by the various relevant war and/or terror threats, are presented in this chapter, together with explanations regarding the extent of the observed damages, including issues related to fire and progressive collapse of buildings, caused by activation of various relevant war or terror threats.

In Chapter 5 of the research report different possible measures aimed at improving the resistance of ordinary civilian structures, especially residential buildings, against the various relevant war and terror threats are presented. These measures are related to a wide range of planning and design issues, including urban planning, building shapes, shapes of structural members, building materials, structural systems and types of external envelopes of ordinary residential buildings that might be affected by various relevant war and/or terror threats.

Chapter 6 presents a summary of the first stage of this research program, including general conclusions and recommendations related to the researched issues, including recommendations related to possible future research activities aimed at improving the resistance of ordinary civilian buildings against war and terror threats.



Founded by מיסודם של

MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING משרד הבינוי והשיכון

TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

Faculty of Civil & Environmental Engineering הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

NATIONAL המכון
BUILDING הלאומי
RESEARCH לחקר
INSTITUTE הבנייה

2009741

Resistance of Ordinary Civilian Buildings Against War Threats-Stage I

Eng. Stephan Schwarz Prof. David Yankelevsky

Copyright© 2010 by Stephan Schwarz, David Yankelevsky, the Israel Ministry of
Construction and Housing and the Technion Research and Development
Foundation Ltd.- Haifa

Haifa

August 2010

המכון לאומי לחקר הבנייה

קרית הטכניון, חיפה 3200003

טל. 04-8292242/3

nbri@tx.technion.ac.il

