



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

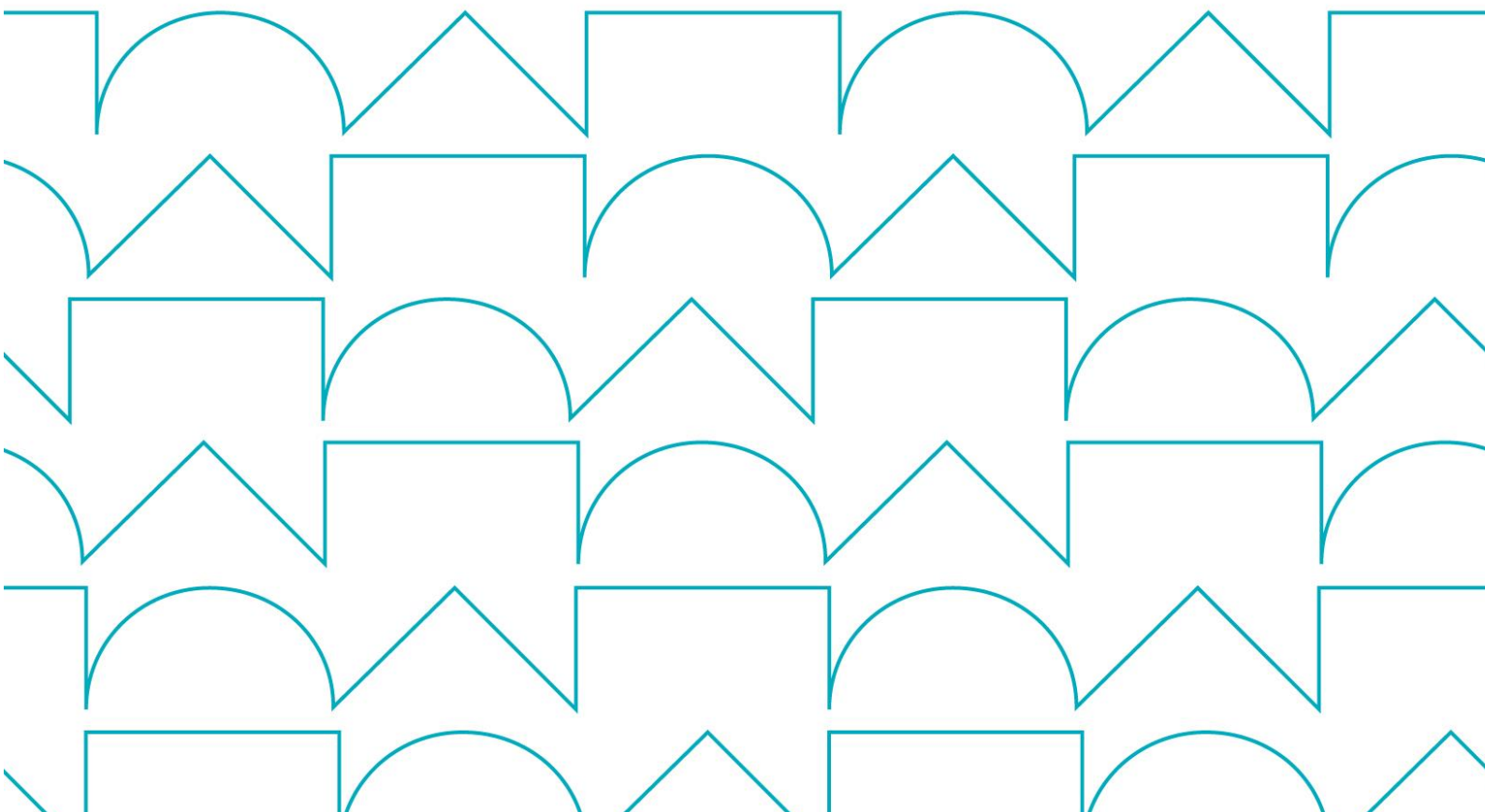
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



תיעוש הבנייה למגורים באמצעות יחידות מודולריות תלת ממדיות – היבטים אדריכליים, הנדסיים וביצועיים

רחל בקר יאשה (יעקב) גרובמן גבי רביב יחיאל רוזנפלד
ניר חן גבי טרכטנברג איתי לויתן עתיר מעין מיכאל תבור





Founded By
Ministry of Construction and Housing
Technion-Israel Institute of Technology
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון
הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2025217

תיעוש הבנייה למגורים באמצעות יחידות מודולריות תלת ממדיות – היבטים אדריכליים, הנדסיים, וביצועיים

פרופ"ח רחל בקר פרופ"ח יאשה (יעקב) גרובמן
ד"ר גבי רביב פרופ"ח יחיאל רוזנפלד
אדר' ניר חן אינג' גבי טרכטנברג M.Sc. ד"ר איתי לויתן
אינג' עתיר מעין M.Sc. כלכלן מיכאל תבור M.Sc.

מלווי מחקר:

אדר' דן רוטשילד אינג' יונתן אופק אינג' נתן חילו אינג' ישראל דוד אינג' רוני גנץ

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
הזמנה מס' 17-20

Copyright © 2019 by R. Becker, Y.J. Grobman, G. Raviv, Y. Rosenfeld, N. Chen,
I. Leviathan, A. Maayan, M. Tavor, G. Trajtenberg,
The Israeli Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

2019 ספטמבר

חיפה

אלול תשע"ט

”למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע”מ והטכניון – מכון טכנולוגי 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 ו/או לצד ג’ כלשהו, עקב המחקר ו/או דו”ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם”.

"רעיונות נועזים הם כמו תנועה של כלי שחמט קדימה; הם עלולים להיות מובסים, אבל הם גם עשויים להתחיל מהלך מנצח"

יוהאן וולפגנג פון גתה

תודות:

צוות המחקר נעזר לאורך תקופת המחקר במספר רב של אנשי מקצוע שתרומתם להצלחת המחקר הייתה חשובה במיוחד, ולכולם אנחנו רוצים להודות ולהביע את הוקרתנו: למנהלים והמהנדסים של חברות הבנייה והמפעלים ישראלמירן, אשטרום, סיבוס רימון, אקרשטיין, ומנרב פלדות, אשר אפשרו לחברי הצוות לבקר במפעלים, להכיר היטב את רמת התיעוש הקיימת כיום בארץ, ולקבל מידע מפורט על תהליכי הבנייה המתועשת הקיימים; לכל המשיבים לשאלון העמדות הממוחשב שהופץ במסגרת המחקר, אשר שמותיהם אינם לפרסום; לכל המשתתפים במפגש סיעור המוחות שהתקיים במסגרת המחקר, ותקצר היריעה מלהציג את שמותיהם; לד"ר איתן שטרית, שהתנסה רבות בבנייה מסוג זה וחלק את הידע שלו עם חברי הצוות בתחומים של פרטי ביצוע, טכנולוגיה, לוגיסטיקה והתהליך הכולל של הבנייה המודולרית; לליאון זילבר, אביב ברוסילובסקי, ושחר איצקוביץ' מחברת פורטה פרו, ולאווולין ווז'ניאק וג'ואנה ראביי מחברת DMD-Modular, שהציגו את הטכנולוגיה של החברות בפני חברי הצוות שסיירו במפעלים בלטביה ובפולין ופרשו בפניהם את ניסיונם המעשי בפרטי הטכנולוגיה; וכן לסטודנטית ניצן ברוש, שסייעה באיסוף, סינון ומיון של רשימת הספרות הארוכה בשלב ההתנעה הראשוני של המחקר.

תוכן עניינים:

i.....	תקציר
1.....	פרק 1: מבוא
3.....	פרק 2: נתוני רקע
6.....	2.1 מראי מקום
7.....	פרק 3: מטרת המחקר
9.....	פרק 4: שיטת המחקר ושלביו
11.....	פרק 5: תמצית סקר הספרות
12.....	5.1 בנייה מודולרית – מהי?
13.....	5.2 מאפייני הבנייה המודולרית
13.....	5.2.1 אפיון לפי אופי המבנה הכולל
15.....	5.2.2 אפיון מידות היחידות
15.....	5.2.3 אפיון לפי חומרי היחידות
16.....	5.2.4 אפיון לפי מבנה היחידות
16.....	5.3 הניסיון המצטבר בבנייה מודולרית לגובה
19.....	5.4 יתרונות וחסרונות של בנייה מודולרית
21.....	5.5 היבטי תכנון, ביצוע, וניהול פרויקטים ייחודיים לבנייה מודולרית
21.....	5.5.1 ניהול תהליך התכנון והביצוע בבנייה מודולרית
22.....	5.5.2 תכנון אדריכלי
23.....	5.5.3 תכנון הנדסי, תפקודי ומערכות הבניין
24.....	5.6 היבטים כלכליים בבנייה מודולרית
27.....	פרק 6: תמונת מצב קיים בישראל
29.....	פרק 7: יתרונות, חסרונות, חסמים, ועמדות מקצועיות
29.....	7.1 שאלון מקצועי אינטרנטי
30.....	7.1.1 מבנה השאלון ותכניו
33.....	7.1.2 ממצאי השאלון
39.....	7.2 מפגש סיעור מוחות ודיון עם יצרנים, קבלנים ומנהלי פרויקטים
41.....	7.3 התכתבות ודיון עם גורמים מקצועיים בחו"ל
46.....	7.3.1 הדיון במסגרת כנס WFTAO, אוסטרליה, ספטמבר 2018
48.....	7.4 דיון עם גורמים בכירים במפעלים בפולין
50.....	7.5 סיכום עמדות ומסקנות

51	מראי מקום	7.6
53	פרק 8: היבטים מקצועיים של בנייה מודולרית פוטנציאלית בישראל	
54	היבטים אדריכליים	8.1
54	הקדמה	8.1.1
54	היבטים של השתלבות במרקם העירוני	8.1.2
	ייחודיות הבנייה הגבוהה למגורים בארץ והשלכותיה על	8.1.3
54	בנייה מודולרית	
	טכנולוגיות בנייה של מבנים מודולריים והשפעתם על התכנון	8.1.4
61	האדריכלי של הבניינים	
62	התאמת דירות ושינויי דיירים	8.1.5
63	תוספות בנייה ושינויים	8.1.5.1
65	פיתוח מקרה מבחן של מגדל מגורים בודד	8.1.6
	פיתוח מקרה מבחן של בניין	8.1.7
72	מגורים/מלון/מעונות סטודנטים/בית אבות	
74	הקשר בין תכנון בעזרת BIM ובנייה מודולרית	8.1.8
74	פרויקט (סטודנטים) סטודיו בבנייה מודולרית	8.1.9
94	היבטים הנדסיים	8.2
94	יציבות וחוזק קונסטרוקציה	8.2.1
98	בטיחות אש	8.2.2
102	הגנה בפני רטיבות	8.2.3
105	בידוד תרמי ותפקוד אנרגטי	8.2.4
108	תפקוד אקוסטי	8.2.5
110	קיים	8.2.6
114	היבטים של מערכות שירות	8.3
119	היבטים טכנולוגיים וביצועיים	8.4
119	אפיון מפעל לייצור יחידות תלת ממדיות	8.4.1
124	ארגון אתר, שינוע, לוגיסטיקה	8.4.2
129	מראי מקום	8.4.3
130	היבטים של ניהול הבנייה	8.5
130	שרשרת האספקה של בנייה קונבנציונלית	8.5.1
131	שרשרת האספקה של בנייה מודולרית	8.5.2
132	ניהול סימולטני של העבודות באתר והייצור במפעל	8.5.3
133	ניהול האיכות	8.5.4

134.....	ניהול הבטיחות	8.5.5
134.....	מראי מקום	8.5.6
136.....	היבטים כלכליים	8.6
136.....	מבוא	8.6.1
137.....	שלבי הבנייה	8.6.2
139.....	מרכיבי עלות הבנייה	8.6.3
139.....	סטטיסטיקה של עלויות השלבים השונים	8.6.3.1
141.....	ניתוח ספציפי כבסיס השוואה בין טכנולוגיות הבנייה	8.6.3.2
143.....	משך השלבים השונים	8.6.3.3
145.....	עלות הדירה לקונה	8.6.3.4
146.....	התחלות וגמר בנייה בישראל	8.6.3.5
148.....	חישוב כדאיות	8.6.4
148.....	כללי	8.6.4.1
148.....	מאפייני מבנים	8.6.4.2
150.....	היוון ותזרים מזומנים	8.6.4.3
	ממצאי ההשוואה בין בנייה קונבנציונלית ובנייה מודולרית	8.6.4.4
151.....	מודולרית	
152.....	החיסכון למשק	8.6.4.5
153.....	ניתוחי רגישות	8.6.5
157.....	תועלות נוספות למשק	8.6.6
157.....	תועלות הבנייה המודולרית כבנייה ירוקה	8.6.6.1
158.....	חסכון בחיי אדם וצמצום תאונות עבודה	8.6.6.2
159.....	סך חסכון שנתי	8.6.6.3
159.....	פתרון מצוקת הדיור	8.6.6.4
160.....	יבוא היחידות המודולריות אל מול ייצור מקומי	8.6.7
160.....	שאלת הבסיס	8.6.7.1
160.....	בעיית כוח האדם	8.6.7.2
163.....	כדאיות כלכלית של הקמת מפעל בישראל	8.6.7.3
166.....	מודל תמריץ לבנייה מודולרית	8.6.8
166.....	האתגר או הבעיה	8.6.8.1
167.....	המקרה הדטרמיניסטי	8.6.8.2
168.....	פרמיית הסיכון הנתפס	8.6.8.3
168.....	דילמה	8.6.8.4
168.....	מודל A רשת הביטחון עם תמריץ התנהגותי	8.6.8.5

169.....	8.6.8.6	הערה לעניין מחירי הדירות
170.....	8.6.8.7	תת מודל IA: תמרוץ ורשת ביטחון פרטניים
170.....	8.6.8.8	התוצאה
172.....	8.6.8.9	תת מודל IIA – תמרוץ ורשת ביטחון ברמת בניין
175.....	8.6.8.10	הערה לסיכום סוגיית המאמץ השיווקי ותמרוצו
176.....	8.6.8.11	מודל B
178.....	8.6.8.12	השוואת עלויות לתקציב המדינה בין מודל All למודל B
180.....	8.6.8.13	מודל C לסינג ומכירה בסוף התקופה
184.....	8.6.9	סיכום ומסקנות
185.....	8.6.10	מראי מקום
189.....	פרק 9:	סיכום, מסקנות, והמלצות
189.....	9.1	סיכום תמציתי
191.....	9.2	החשיבות הקריטית של היערכות מוקדמת
192.....	9.3	מסקנות והמלצות
195.....	נספח א':	סקר ספרות מפורט
195.....	א-1.	היבטים כלליים של תיעוש בנייה
199.....	א-1.1	מראי מקום
201.....	א-2.	תיאור כללי של בנייה עם יחידות מודולריות תלת ממדיות
213.....	א-2.1	מראי מקום
215.....	א-3.	היבטים אדריכליים
215.....	א-3.1	הקדמה
215.....	א-3.2	רקע היסטורי
218.....	א-3.3	ספרים מקצועיים חשובים על בנייה מתועשת ובנייה מודולרית
219.....	א-3.4	ספרים מקצועיים מובילים מהעשור האחרון
220.....	א-3.5	ירחונים מקצועיים בנושא בנייה מתועשת
	א-3.6	מאמרים אקדמיים נבחרים מתחילת המאה ה-21 בנושא מחקרים בבנייה מודולרית
221.....	א-3.7	מראי מקום
225.....	א-4.	היבטים מבניים (קונסטרוקציה)
228.....	א-4.1	מראי מקום
250.....	א-5.	שיטות בנייה והיבטים טכנולוגיים של היחידות
253.....	א-5.1	מראי מקום
263.....	א-6.	היבטים של תפקוד פיסי וקיימות
264.....		

273.....	א-6.1 מראי מקום
275.....	א-7. מערכות בבנייה מודולרית
275.....	א-7.1 כללי
	א-7.2 התייחסות טכנית פרטנית למערכות המבנה – המדריך של
278.....	Monash University
279.....	א-7.2.1 מערכות צנרת (המכונות במסמך hydraulics)
280.....	א-7.2.2 מערכות חשמל
	א-7.2.3 מערכות חימום וקירור
281.....	(HVAC: Heating Ventilation Air Conditioning)
281.....	א-7.3 מראי מקום
283.....	א-8. היבטים של תהליך ובקרת הביצוע
289.....	א-8.1 מראי מקום
291.....	א-9. היבטים כלכליים של בנייה מודולרית
299.....	א-9.1 מראי מקום
301.....	א-10. יישום BIM בתהליכי הבנייה
303.....	א-10.1 מראי מקום
305.....	א-11. היבטים רגולטוריים
307.....	א-11.1 מראי מקום
308.....	א-12. מקרי בוחן
324.....	א-12.1 מראי מקום
326.....	א-13. בנייה במכולות
331.....	א-13.1 מראי מקום
332.....	א-14. מדריכים וספרים
337.....	א-14.1 מראי מקום
I.....	תקציר באנגלית

רשימת ציורים:

- ציור 7.1.1: פילוג נתוני המשיבים: תחום מקצועי 33
- ציור 7.1.2: פילוג נתוני המשיבים: ניסיון בתחום הבנייה 33
- ציור 7.1.3: פילוג נתוני המשיבים: ניסיון מעשי בתחום של בנייה מתועשת 33
- ציור 7.1.4: פילוג נתוני המשיבים: היכרות עם בנייה מתועשת ביחידות תלת ממדיות 34
- ציור 7.1.5: יתרונות הבנייה המודולרית לעומת הבנייה הקונבנציונלית 35
- ציור 7.1.6: יתרונות הבנייה המודולרית לעומת הבנייה הטרומית הרגילה 35
- ציור 7.1.7: חסרונות וחסמים של הבנייה המודולרית בהשוואה לבנייה הקונבנציונלית 36
- ציור 7.1.8: חסרונות וחסמים של הבנייה המודולרית בהשוואה לבנייה הטרומית הרגילה 36
- ציור 7.1.9: מהם סוגי המבנים להם מתאימה הבנייה המודולרית? 37
- ציור 7.1.10: האם נכון לקדם את הבנייה המודולרית בארץ? 37
- ציור 7.1.11: מי צריך להוביל את קידום השיטה בארץ? 38
- ציור 8.1.1: חתך מבנה עקרוני ותוכנית קומה טיפוסית של בניין מגורים המבוסס על גרעין מרכזי מבטון הכולל ממ"ק 56
- ציור 8.1.2: תוכנית קומה טיפוסית של מבנה מגורים בו הדירות מקבלות 3 כיווני אויר 57
- ציור 8.1.3: בניין מגורים המבוסס על יחידות מודולריות תלת ממדיות 57
- ציור 8.1.4: אפשרויות פתרון למרפסות (למעלה שמאל: מרפסת סלון כחלק מיחידה מודולרית, למעלה ימין – מרפסת כיחידת נפרדת. למטה – מרפסת גדולה המבוססת על חלקים משתי יחידות מודולריות) 58
- ציור 8.1.5: אפשרויות פתרון למרפסות – פתרון קונסטרוקציה (תמונה לקוחה מפרויקט הסטודיו בטכניון של הסטודנטית טל בן שמחון בהנחיית אדריכל ניר חן) 59
- ציור 8.1.6: ריכוז המערכות בבניין ביחידה אחת – תוכנית 60
- ציור 8.1.7: ריכוז המערכות בבניין ביחידה אחת – הדמיה 61
- ציור 8.1.8: שילוב של מספר דירות בבניין המבוסס על בנייה מודולרית 62
- ציור 8.1.9: הוספת יחידות לבניין. ימין: מצב התחלתי. שמאל: תוספת יחידה של 20 מ"ר, 62
- הכוללת חדר שינה ואמבטיה והפיכת דירת 4 חדרים לדירת 5 חדרים 63
- ציור 8.1.10: פירוט המודולים בהוספת היחידה לבניין. ימין: מצב התחלתי. שמאל: תוספת היחידה של 20 מ"ר, הכוללת חדר שינה ואמבטיה, לדירה המקורית בת 4 חדרים 64
- ציור 8.1.11: הוספת יחידות לבניין. ימין: שימוש ביחידה כתוספת חדר מגורים/יחידת הורים. שמאל: תוספת יחידת סטודיו של כ- 20 מ"ר 65

66	ציור 8.1.12: קומפלקס מגורים מיחידות מודולריות תלת ממדיות
	ציור 8.1.13: היחס בין המסד הבנוי בבנייה רגילה לחלק העליון הבנוי מיחידות מודולריות
67	ציור 8.1.14: השתלבות יחידות המגורים עם הליבה
68	ציור 8.1.15: שילוב של מספר דירות בבניין המבוסס על בנייה מודולרית
68	ציור 8.1.16: דגם A – דירת שלושה חדרים, המבוססת על שלוש יחידות מודולריות
69	ציור 8.1.17: דגם B – דירת שלושה חדרים, המבוססת על שתי יחידות מודולריות
69	ציור 8.1.18: דגם C – דירת שלושה וחצי חדרים, המבוססת על שתי יחידות מודולריות
70	ציור 8.1.19: דגם D – דירת ארבעה חדרים, המבוססת על שלוש יחידות מודולריות
70	ציור 8.1.20: דגם E – דירת חמישה חדרים, המבוססת על ארבע יחידות מודולריות
	ציור 8.1.21: דגמים F ו G – שילוב של דירת ארבעה חדרים ודירת סטודיו, המבוססות על ארבע יחידות מודולריות
71	ציור 8.1.22: דגם H – דירת שני חדרים, המבוססת על שתי יחידות מודולריות
73	ציור 8.1.23: מבטים על הבניין
73	ציור 8.1.24: תוכנית והחלוקה ליחידות מודולריות של יחידת המגורים
115	ציור 8.3.1: אפשרויות של חיבורי מערכות בבנייה מודולרית
	ציור 8.4.1: הדגמה של תוכנית מפעל לייצור יחידות תלת ממדיות עבור בנייה מודולרית
123	ציור 8.4.2: סוגי העגורנים אל מול דרישות ההנפה של יחידות מודולריות (Building and Construction Authority)
125	ציור 8.6.1: המשקל היחסי של עלויות הבנייה מתוך מחיר הבנייה גרידא
141	ציור 8.6.2: סך התחלות בניית הדירות למגורים אל מול גמר בניית דירות למגורים, בשנים 2010-2017 (באלפי דירות), ושטח התחלות בנייה למגורים (באלפי מ"ר)
147	

רשימת טבלאות:

- טבלה 2.1: תחזית צרכי הדיור לשנים 2017-2040 (משרד ראש הממשלה 2017) 3
- טבלה 2.2: יעדי עבודה ומדדי הצלחה (משרד הבינוי והשיכון 2016) 4
- טבלה 2.3: מדדי הצלחה של רמות התיעוש (משרד הבינוי והשיכון 2016) 5
- טבלה 8.4.1: השוואה של נתוני פרויקטים ופתרונות הנפה בפרויקטים של בנייה מודולרית 126
- טבלה 8.6.1: השוואה של היתרונות המשפיעים על ההיבט הכלכלי לפי סוג טכנולוגית הבנייה 138
- טבלה 8.6.2: סיווג מרכיבי הבנייה לפי שלבי הבנייה 139
- טבלה 8.6.3: עלויות לפי שלבי הבנייה, מתוקננות לפי מדד תשומות הבנייה 139
- מדצמבר 2012 למרץ 2019 142
- טבלה 8.6.4: מחירי הדירות בשנת 2016, לפי שומת מקרקעין במשרד המשפטים 145
- טבלה 8.6.5: נתונים נבחרים של ענף הבנייה לשנים 2010 עד 2017 146
- טבלה 8.6.6: פירוט עלויות הבנייה באומדן 149
- טבלה 8.6.7: זמני הביצוע המשמשים באומדן (בחודשים) 150
- טבלה 8.6.8: לוח זמנים חזוי לפי רבעונים עבור פרויקט האומדן 151
- טבלה 8.6.9: חישוב הרווח היזמי 152
- טבלה 8.6.10: אומדן החיסכון למ"ר למשק בבנייה מודולרית לעומת בנייה קונבנציונלית 153
- טבלה 8.6.11: הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בשני סוגי הבנייה 154
- טבלה 8.6.12: הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה זו ביחס למ"ר בבנייה קונבנציונלית, ובעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה קונבנציונלית 154
- טבלה 8.6.13: הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה זו ביחס למ"ר בבנייה קונבנציונלית, ובעלות ההובלה הימית הכוללת ליחידה מודולרית 155
- טבלה 8.6.14: הרווח העודף ליזם הבונה בבנייה המודולרית כתלות באחוז ההיוון השנתי 156
- טבלה 8.6.15: הרווח העודף ליזם הבונה בבנייה המודולרית כתלות במחיר מכירת הדירה 156
- טבלה 8.6.16: הערכת מינימום של החיסכון למשק מהקטנת פסולות והגברת הבטיחות בעבודה בזכות בנייה מודולרית 159
- טבלה 8.6.17: ריכוז יתרונות מול חסרונות בייצור מקומי מול יבוא 161
- טבלה 8.6.18: מאפיינים של מספר מפעלים בעולם 164
- טבלה 8.6.19: ניתוח לדוגמא של תת מודל IA 171

טבלה 8.6.20: ניתוח לדוגמא של מודל IIA כשהיזם מוכר מעל למחיר הנורמטיבי (אלפי ₪).....	173
טבלה 8.6.21: ניתוח לדוגמא של מודל IIA כשהיזם מוכר תחת למחיר הנורמטיבי (אלפי ₪).....	175
טבלה 8.6.22: תחזית למספר הדירות שיבנו בישראל בשנים 2024 – 2026.....	179
טבלה 8.6.23: ניתוח לדוגמא של עלות למדינה במודל IIA.....	179
טבלה 8.6.24: ניתוח לדוגמא של העלות למדינה במודל B.....	180
טבלה 8.6.25: ניתוח לדוגמא של העלות למדינה לפי מודל C כשדירות לא נמכרות או נפגמו עקב ליקויי קיים גבוהים מאלה שבבנייה הקונבנציונלית.....	183
טבלה 8.6.26: ניתוח לדוגמא של פיצוי ליזמים במקרה של דירה ריקה בתקופת ההחכרה.....	184
טבלה 8.6.27: ניתוח לדוגמא של עלויות כוללות למדינה לפי מודל C.....	184

תקציר

על פי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (למ"ס), אוכלוסיית ישראל צפויה להגיע עד שנת 2048 לכ- 15 מיליון תושבים. צרכי הדיור ילכו ויגדלו בקצב הולך וגדל, ויעלו לכ- 67,000 יח"ד לשנה בשנים 2036-2040. בטכנולוגיות המקובלות בישראל, משך הבנייה הממוצע של יחידת דיור עומד כיום על כ- 26 חודשים, וכושר הייצור הכללי הוא כ- 50,000 יח"ד לשנה. לצד אלה קיים מחסור חמור בכוח אדם מתאים לעבודות בנייה באתר, והביקוש לפועלים זרים הולך וגדל.

כדי לצמצם את הפער ההולך וגדל בין הצרכים לבין כושר הייצור, ענף הבנייה חייב להתייעל. אחד האמצעים המוכחים לייעול הבנייה הוא תיעוש. טכנולוגיה המבוססת על בנייה לגובה באמצעות יחידות מודולריות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, המכונה בקיצור בנייה מודולרית, היא אחת הטכנולוגיות המתועשות ביותר. לפי הניסיון המצטבר בחו"ל יש לטכנולוגיה זו סיכוי רב להגביר את כושר הייצור לבנייני מגורים מסוגים שונים (מעונות, דיור מוגן, דיור להשכרה, וכד') וכן לבניינים מסוגים אחרים (מוסדות חינוך, אכסניות, בתי מלון, בתי חולים, וכד').

בעשורים האחרונים הצטבר בעולם (בעיקר בארה"ב, בריטניה, לטביה, פולין, פינלנד, שבדיה, דנמרק, רוסיה, סין, סינגפור, יפן, ואוסטרליה) ניסיון רב ביישום של בנייה מודולרית עבור בניינים גבוהים ורבי קומות. לאחרונה הוקם בטכנולוגיה זו בניין מגורים בן 32 קומות בברוקלין ניו יורק, וכעת נמצא בבנייה פרויקט מגורים בן 40 קומות בסינגפור.

במחקר הנוכחי בוצע לראשונה לימוד יסודי של הידע והניסיון שהצטברו בחו"ל על היישום והפרטים של טכנולוגיית הבנייה המודולרית, ונבחנה ישימות של בנייה כזו בישראל.

עיקר הפעילות בבנייה מודולרית הוא במפעל, בו מיוצרות יחידות תלת ממדיות גדולות על שולחנות עבודה, לרוב בשיטת סרט נע (כמו בתעשיית המכוניות והאוטובוסים), שבסופו יוצאת יחידה מוגמרת במידות של כ- 3.4 מ' רוחב, כ- 10 עד 16 מ' אורך, וגובה של קומה אחת. שלד היחידה מהווה גם מרכיב עיקרי ולפעמים בלעדי בשלד הבניין הסופי; קירותיה והמחיצות שבה כוללים כבר את הבידוד התרמי והאקוסטי הדרושים, והם יהיו קירות החדרים השונים; ואפילו הצנרת, החיווט, האביזרים החשמליים, הכלים הסניטרים, הריצוף, החלונות והדלתות כבר מותקנים בה. בבנייה לא גבוהה במיוחד, בדרך כלל עד 6 קומות, ניתן לבנות בניין המבוצע כולו רק מיחידות כאלו. כתלות בפונקציות אחרות בבניין ובגובה הבניין, יידרשו בפרויקט גבוה יותר קומות מסד מבנייה קונבנציונלית וגרעין הקשחה מרכזי בבנייה קונבנציונלית. בבניינים גבוהים במיוחד, בני עשרות קומות, יידרש שלד נפרד והיחידות התלת ממדיות יושחלו לתוכו (ידוע בספרות כ- "בניין מגירות", או "בניין קפסולות"). בישראל, בגלל דרישות המיגון וההכרח לבנות מרחבים מוגנים בכל קומה, בנייה מודולרית תכלול תמיד גרעין מרכזי מבטון.

ייצור היחידות במפעל מתקיים במקביל במספר קווי ייצור ומתקדם בתזמון ובתיאום עם הדרישה להן באתר הבנייה. התקדמות הבנייה באתר היא מהירה מאוד ובדרך כלל מתאפשרת הרכבה של 6 עד 10 יחידות ביום עבודה באמצעות עגורן יחיד. אחד המאפיינים העיקריים של הבנייה המודולרית הוא, לפיכך, משך ביצוע כולל קצר מאוד של כל הפרויקט, תוך קיצור השהות באתר בעשרות אחוזים. כשהמפעל אינו רחוק מאוד מאתר הבנייה (בגלל מידותיה הקטנות של ישראל, המרחקים בארץ נחשבים קצרים באופן בלתי תלוי היכן ימוקם מפעל כזה – אם יוקם בארץ) היחידות משונעות אליו, בדרך כלל, בהתאם לקצב התקדמות ההרכבה, כך שהיחידה נפרקת מהמשאית ומונפת ישירות אל מקומה הסופי בבניין. כשהיחידות מיובאות ממדינה אחרת בהובלה ימית (כפי שיקרה, כנראה, בשנים הראשונות ליישום הטכנולוגיה בישראל), מתחייב שינוע כמות גדולה של יחידות בבת אחת, ולכן נחוץ אחסון ביניים, הן בצד היצרן והן בצד הלקוח, הדורש שטחים ייעודיים והנפות ביניים.

באתר הבנייה מבוצעות אומנם עבודות קונבנציונליות במערכת התת-קרקעית, בקומות מסד כאשר הן קיימות, ובגרעין ההקשחה המרכזי, אך בכל החלק המבוסס על בנייה מודולרית, שהוא מרבית שטח הבנייה, מבוצעות אך ורק עבודות יבשות. אלו כוללות: שימה ופילוס של היחידות, ביצוע חיבורים בין היחידות ובין לבין גרעין ההקשחה, חיבור חלקי מערכות השירות היוצאים מהיחידות אל המערכות המשותפות, ביצוע חסימות אש ואיטום מישקים, ובגג הבניין – התקנת שכבות הבידוד התרמי ומערכת השיפועים והאיטום של הגג.

בשל הביצוע של רוב העבודות במפעל מסודר, מצויד ומאובזר בקפידה, בגובה עבודה נוח מבחינה ארגונומית ובנגישות טובה לכל מרכיב, בתנאי עבודה נוחים, בתנאי בטיחות טובים, ובמסגרת תעסוקתית יציבה ומתמשכת, הדיוק והאיכות של היחידות בכללותן ושל מרכיביהן הפרטניים טובים לאין-ערוך מאלה המתקבלים בבנייה קונבנציונלית באתר. העבודה המתוכננת היטב במפעל מאפשרת גם הקטנה ניכרת של כמויות פסולת הבנייה ומחזור של חלק ניכר ממנה. ההפחתה הניכרת הן במספר העובדים והן במספר השעות הכולל שהם שוהים באתר, יחד עם צמצום ניכר של עבודה בו-זמנית של עובדי קבלן מסוגים שונים, מקטינה מאד את החשיפה ההדדית שלהם לתאונות עבודה, ותורמת להגברת הבטיחות בעבודה. יחד עם זאת, התלות בעבודה עם עגורנים כבדים המניפים יחידות כבדות ומגושמות, מהווה סיכון בטיחותי המחייב התארגנות הולמת. על אף השינוע של כשמונה יחידות מודולריות ליום אל האתר, רמת התנועה הכוללת של משאיות אל האתר וממנו פחותה מזו שבבנייה הקונבנציונלית, היות שאין כמעט שום שינוע של חומרים ורכיבים אחרים. בהיותה יבשה בעיקרה, העבודה באתר כמעט שאינה מפריעה לסביבה.

המעבר מבנייה קונבנציונלית למודולרית הוא מאתגר מכמה בחינות ולא בכדי היא מתקשה להתחרות בבנייה המסורתית של כל מדינה ומדינה. בעלי-העניין השונים (לקוחות, יזמים, מתכננים, קבלנים, גופי רישוי, גופי תקינה וכו') מצויים כולם ב"אזור נוחות" עם השיטות הקיימות המוכרת להם היטב לטוב ולרע. בבנייה מודולרית, לעומת הקונבנציונלית, חייבים לסיים את התכנון על כל פרטיו לפני תחילת ייצור היחידות, וכמעט שלא קיימת גמישות לשינויים בתכנון תוך כדי הביצוע. זה דורש, כמובן, שינוי

תפיסתי של תהליך התכנון, ולכן סביר להניח שבתחילת הדרך תהיינה לא-מעט תקלות בגלל נורמות התנהלות ישנות. ללא-ספק, יידרשו שנים ל"עקומת למידה" עד אשר היתרונות של התפיסה החדשה ייטמעו, וכל בעלי העניין יתרגלו לעבוד בהרמוניה לפי התפיסה החדשה. מכל מקום, בזכות התכנון המפורט מראש, ניתן לתכנן מראש גם את לוח הזמנים, העלויות, ותזרים המזומנים לכל התהליך, ואלה מתממשים, בדרך כלל, ללא סטיות ניכרות. כתוצאה, רמת האמינות של כל ההתקשרויות גדלה ומאפשרת בדרך כלל סיום הפרויקט ללא תביעות הדדיות.

הניסיון המצטבר בחו"ל הוכיח שיתרונות הטכנולוגיה העיקריים כוללים: קיצור משך הביצוע הכולל של פרויקט הבנייה בכ- 35% עד 65%; שליטה טובה בתהליך ובאיכות, הפחתת הטעויות בבנייה ושיפור איכות הבנייה; חיסכון בכוח אדם באתר הבנייה בכ- 50% עד 75%, והגברת הפיריון פי 3 עד 4; הגברת הבטיחות בעבודה פי 3 עד 4 למשך כל הפרויקט; הפחתה של פסולות בנייה בשיעור של כ- 90%, והפחתות של כ- 60% במספר האספקות לאתר, וכ- 70% בהסעות עובדים וחומרים לאתר; הקטנה ניכרת של השפעת הבנייה על סביבת האתר מבחינת רעש וזיהום אוויר; ושיפור מהותי בתנאי העבודה של כלל העוסקים במלאכה.

בחינת עמדות שבוצעה במסגרת המחקר העלתה, בדומה לסקרי עמדות שבוצעו גם במספר מקומות אחרים בחו"ל, שהציבור המקצועי אכן מכיר ביתרונות הטכנולוגיה המפורטים לעיל, אך מזהה מספר חסרונות, שנובעים בעיקר מחוסר היכרות עם רזיה. החסרונות העיקריים שזוהו מבחינה זו הם: הצורך בתיאום כל הגורמים מראשית הפרויקט, תוך לקיחה בחשבון של פרטי הטכנולוגיה כבר בשלב התכנון הראשוני; החשיבות הרבה של תכנון מלא ומפורט והשלמתו טרם תחילת ביצוע עבודות כלשהן עבור הפרויקט; אילוצי שינוע המשפיעים על מידות הרכיבים, עלות, והיבטים קונסטרוקטיביים של הרכיבים בעת השינוע; חוסר האפשרות לביצוע שינויים תוך כדי הביצוע באתר והגמישות המופחתת לביצוע שינויים בעתיד; העלות הראשונית הגבוהה הכרוכה בהקמת מפעלים, ושטחי הביצוע והאחסון הגדולים הדרושים במפעל, וזאת בעיקר בתנאי אי וודאות לגבי רציפות הפעילות של המפעל; עיצוב ואסתטיקה (כשאינן חזית חיצונית נוספת מותקנת באתר) שנובעים מהמודולריות, החזרתיות, וקיום התפרים בין היחידות; פערי ידע בקרב הציבור המקצועי; והעובדה שמבחינה כלכלית היא כדאית רק כאשר כוח העבודה הזמין לבנייה הקונבנציונלית הוא יקר יחסית, בין משום שקיים מחסור בכוח אדם לא מקצועי או מסיבות אחרות (למשל, במקומות שונים בארה"ב – הכורח לעבוד רק עם עובדים מאוגדים).

במפגש סיעור מוחות רב-משתתפים, שהתקיים במסגרת המחקר, נטען במפורש שקל להתגבר על החסרונות המפורטים לעיל, והם אינם מהווים חסם ליישום הבנייה המודולרית בישראל. צעד ראשון לקראת התגברות זו הוא למעשה דו"ח המחקר הנוכחי, הכולל בפרקיו השונים מידע מפורט על טכנולוגית הבנייה המודולרית (ובכלל זה סקר ספרות מפורט מאוד של כ- 150 מקורות מסוגים שונים הנתון בנספח א' לדו"ח, ומדריך תמציתי למתכננים ולמבצעים הנתון בפרקים 8.1 - 8.5 של הדו"ח). לצד החסרונות הטכנולוגיים הפתורים, הובחן חסם בעייתי שאינו טכנולוגי, החוזר ומופיע גם בחו"ל, והוא סטיגמה ודעות קדומות שהתקבעו כנגד בנייה טרומית בכלל, הגורמים לאי וודאות לגבי התגובה

של רוכשי דירות פוטנציאליים. אי וודאות מסוג זה עוצרת יזמות פרטית, וקשה לנטרל אותה כל עוד לא מנתצים את הסטיגמה.

יחד עם זאת, ממצאי סקר העמדות שבוצע במחקר הראו שקיימת תמיכה מלאה של הציבור המקצועי ביישום הטכנולוגיה, ולדעתו היא נדרשת מהר ככל האפשר, אך המשיבים ציינו בפירוש שהגורמים המובילים צריכים להיות המגזר הממשלתי, היצרנים והאקדמיה.

שאלה נוספת וחשובה שהמחקר בחן היא: האם ובאילו תנאים קיימת כדאיות כלכלית להחדרת הבנייה המודולרית לגובה לישראל? הנחת היסוד בבחינה זו הייתה שבשלב ראשון היחידות ייובאו מחו"ל, דבר שישפיע לרעה על ההיבט הכלכלי. הבחינה הראתה שקיים סיכוי סביר שבתנאים מסוימים בנייה זו תהיה אפילו רווחית יותר ליזם הבודד (כאשר עלות התשומות הישירות קטנה בכ- 10% או יותר מזו שבבנייה הקונבנציונלית, דבר שיש לו סיכוי להתממש כשבנייה זו תהפוך שגורה יותר), אך עיקר הכדאיות הכלכלית היא בהיבט המקרו-כלכלי מנקודת המבט הרחבה של המדינה, וזאת בזכות התועלות הנוספות הנובעות מחיסכון בפסולת ובאנרגיית ייצור, הפחתת מטרדים והגברת הבטיחות (כמפורט בניתוח הכלכלי בסעיפים 8.6.1 – 8.6.7 בדו"ח המחקר).

לנוכח כל אלה, הטכנולוגיה של בנייה מודולרית נמצאה, ונחשבת כך גם בחו"ל, כבעלת פוטנציאל לקידום ענף הבנייה, לשיפור מהותי של תדמיתו, ולהעלאתו לרמה מקבילה לזו של התעשיות הכבדות האחרות, כגון תעשיית המכוניות, האוטובוסים, המטוסים, והאווניות.

למרות הממצאים הללו, אופייה החדשני של הטכנולוגיה, היעדר ניסיון ביישומה בבנייה לגובה בישראל, וזיהויה כ"בנייה טרומית" עוצר יזמים פוטנציאליים מ"כניסה להרפתקה". לכן, כדי למצות את יתרונותיה, יש להיערך להחדרתה תוך הובלה של גורם ממלכתי מנהיגותי. על מנת להתגבר על הסטיגמה, יש חשיבות עליונה להיערכות נכונה לתהליך ההחדרה, תוך שימת דגש על איכות המוצר הסופי, על מצוינות בתכנון ובביצוע, ועל מיתוג הבנייה המודולרית כבנייה איכותית.

לנוכח היתרונות והסיכוי הגבוה לכדאיות כלכלית של הבנייה המודולרית, מומלץ לבצע, כאמור, **פרויקט פיילוט בהובלה של משרד הבינוי והשיכון**, אשר יעניק תמריץ ליזמים שייכללו בפיילוט. בהעדר מפעלים קיימים בישראל שהם בעלי ניסיון מוכח בבנייה מודולרית לגובה, מומלץ שבשלב הראשון (כנראה בשלוש השנים הראשונות) היחידות התלת ממדיות ייובאו ממפעלים בחו"ל. כמו כן מומלץ שבתחילת התהליך המפעלים יספקו גם צוותי הרכבה מיומנים שיוצמדו להם צוותים ישראלים שילמדו את העבודות, על כל מרכיביהן (דיוק במיקום ופילוס, חיבורים, פרטי איטום, חסימת אש, וכד').

כדי שיזמים לא יירתעו מהשתתפות בפיילוט עקב רמה גבוהה מדי של אי וודאות ונטילת סיכונים, יש **לבצע את הפיילוט במסגרת של תמרוץ/פיצוי**. במסגרת המחקר פותחו מספר מודלים אפשריים של תמרוץ/פיצוי, הכוללים: A – מודל רשת ביטחון עם תמריץ התנהגותי, שניתן ליישמו ברמת הדירה או ברמת הבניין השלם; B – מודל רשת ביטחון ותמריץ על בסיס הקלות מיסוי; C – מודל ליסינג ומכירה

בסוף התקופה. שלושת המודלים מפורטים ומודגמים בסעיף 8.6.8 בדו"ח המחקר, והחלטה לגבי המודל המועדף ואופן יישומו צריכה להתקבל על ידי המערכת הממשלתית המנהלת את הפיילוט.

לקראת הפעלת הפיילוט **נדרשת היערכות מוקדמת**, הכוללת מספר מרכיבים:

- **יצירת תשתית שיטתית וברורה**, מגדירה לכל יזם שמעוניין להיכנס לתהליך הפיילוט את כל הנדרש ממנו על מנת להיות מועמד לכך.
- הקמה והפעלה של **וועדה מקצועית לצד המשרד**, אשר תסייע בקביעת הקריטריונים לבחירת פרויקטי הפיילוט, ובבחינה של ההצעות שיוגשו בעקבות מכרזים בנושא.
- בכל תהליך שייבחר לביצוע הבחירה של הזוכים להשתתף בפיילוט, יש להבטיח **שלמצינות ההצעה יש מרכיב גבוה בקריטריוני הזכייה**.
- כתנאי מוקדם להבטחת אובייקטיביות והחלטות איכותניות, יש לוודא **ששיטות הבנייה הספציפיות**, שתהיינה מועמדות להשתתף בפיילוט, **הוכיחו את התאמתן למכלול הדרישות** התכנוניות והביצועיות, וככל שיטת בנייה חדשה, **נבחנו ואושרו** במסגרת היחידה לבחינה ולאישור של שיטות בנייה חדשות במכון הלאומי לחקר הבנייה.

מומלץ ללוות את הפיילוט במחקר במסגרתו יבוצע מעקב צמוד אחרי הביצועים המושגים בפועל מבחינת התהליך (החל משלבי התכנון הראשוניים ושיתוף פעולה של כל הגורמים בעלי העניין, עבור דרך תהליכי השינוע, הרכבה, ועבודות גמר בבניין), מבחינת לוחות הזמנים, האיכות, ונקודות התורפה המתגלות בפועל.

פרק 1: מבוא

על פי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (למ"ס), אוכלוסיית ישראל צפויה להגיע עד שנת 2048 לכ- 15 מיליון תושבים. צרכי הדיור ילכו ויגדלו בקצב הולך וגדל, ויעלו לכ- 67,000 יח"ד לשנה בשנים 2036-2040. ענף הבנייה אינו מסוגל לספק בטכנולוגיות הנוכחיות יותר מ- 50,000 יח"ד לשנה. כדי לצמצם את הפער ההולך וגדל בין כושר הייצור לבין הצרכים, חייבים ליעל את הענף. אחד האמצעים המוכחים ליעול הבנייה הוא תיעוש. טכנולוגיה המבוססת על בנייה לגובה באמצעות יחידות מודולריות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, המכונה בקיצור בנייה מודולרית, היא אחת הטכנולוגיות המתועשות ביותר, ולפי הניסיון המצטבר בחו"ל יש לה סיכוי רב להגביר את כושר הייצור לבנייני מגורים מסוגים שונים (מעונות, דיור מוגן, דיור להשכרה, וכד') ולבניינים מסוגים אחרים (מוסדות חינוך, אכסניות, בתי מלון, בתי חולים, וכד'). בעשורים האחרונים הצטבר בעולם ניסיון רב בטכנולוגיות כאלה לבנייה רוויה, ולאחרונה הוקם בה בניין מגורים רגיל בן 32 קומות בברוקלין ניו יורק. בחינה של ישימות טכנולוגיות מסוג זה בבנייה הרוויה בישראל לא בוצעה עד כה.

בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות קיימת אומנם בישראל, אך היא מיושמת רק בבנייה נמוכה, בעיקר לגני ילדים ומבני חינוך, ולבנייה ארעית למגורים (למשל "קרווילות") ומעט מאוד לבניית קבע, ולא הצטבר ידע מסודר ומתועד לגביה.

מטרת המחקר הנוכחי הייתה לבחון את מכלול ההיבטים הרלוונטיים לאפשרות היישום של טכנולוגיות כאלה בבנייה של בנייני מגורים גבוהים ורבי קומות בישראל, ולהכין תשתית מקצועית ראשונית לבנייה מסוג זה.

המחקר בוצע על ידי צוות בינתחומי שכלל 4 חוקרים ראשיים מהמכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון: פרופ"ח רחל בקר (תפקוד הבנייה), פרופ"ח יאשה (יעקב) גרובמן (אדריכלות), ד"ר גבי רביב (שיטות בנייה ומערכות), פרופ"ח יחיאל רוזנפלד (ניהול, ביצוע וכלכלת הבנייה), ועוד 5 חוקרים שותפים, הפעילים באופן שוטף כאנשי מקצוע בענף הבנייה הישראלי: אדריכל ניר חן (אדריכלות), מהנדס גבי טרכטנברג M.Sc. (הנדסת מבנים – קונסטרוקציות), ד"ר איתי לויתן (הנדסת מבנים – קונסטרוקציות), מהנדס עתיר מעיין M.Sc. (ביצוע וניהול הבנייה), כלכלן מיכאל תבור M.Sc. (ייעוץ כלכלי). כחלק מהפעילויות במהלך המחקר, החוקרים אספו מידע על המצב בישראל באמצעות שאלונים וסיורים במפעלים של בנייה מתועשת, בחנו את העמדות הכלליות של הציבור המקצועי לגבי בנייה מסוג זה באמצעות שאלון אינטרנטי, וקיימו מפגש סיעור מוחות לגבי חסמים ודרכי התמודדות, בו השתתפו בכירים בענף הבנייה כולל נציגים של מפעלים לבנייה מודולרית ובנייה טרומית, חברות קבלניות ויזמיות, ומנהלי פרויקטים.

דו"ח המחקר כולל בפרק 2 נתוני רקע המבהירים את הצורך בהחדרת תיעוש אינטנסיבי לענף הבנייה הישראלי. פרק 3 מבהיר את מטרות המחקר ופרק 4 את שיטת המחקר ושלביו. פרק 5 כולל את

תמצית הממצאים והמסקנות של סקר הספרות, אשר מוגש באופן מקיף ומפורט בנספח א'. ביצועו של סקר הספרות נמשך לכל אורך תקופת המחקר על מנת להבטיח שהוא מעודכן עד למועד הבאת הדו"ח הנוכחי לדפוס. פרק 6 מסכם את המצב הקיים בישראל כפי שעלה מהשאלונים שמולאו על ידי היצרנים ומהסיוורים במפעלים. פרק 7 מסכם את העמדות המקצועיות שהובעו על ידי הציבור המקצועי בשאלון האינטרנטי, במפגש סיעור המוחות, ובתכתובת עם גורמים מקצועיים מחו"ל. פרק 8 מנתח במפורט את ההיבטים המקצועיים של בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, תוך התייחסות לאפשרויות היישום שלה בישראל, ולבעיות ספציפיות כגון אילוצים ומגבלות של מידות, חסמים רגולטוריים, התאמה לצרכי לקוח, וגמישות לשינויים עתידיים. הנושאים המטופלים בתתי הפרק כוללים: היבטים אדריכליים (היבטים של השתלבות במרקם העירוני. אדריכלות הבניין עצמו – לפי סוגי בניינים: טיפולוגיה. התאמה לחוקי הבנייה. מידות); היבטים הנדסיים (יציבות וחוזק קונסטרוקציה, בטיחות אש, הגנה בפני רטיבות, בידוד תרמי, הפרדה אקוסטית, קיים); היבטי מערכות שירות (תברואה, חשמל, תקשורת, גז, וכו'); היבטים טכנולוגיים (הכשרת כוח אדם, ציוד, ארגון אתר, שינוע, לוגיסטיקה); היבטי ניהול פרויקטים (ניהול התכנון ואינטגרציה יזם-יצרן-קבלן-מתכננים מתחילת הפרויקט, לו"ז, תיאום מול רשויות, ביטוחים); היבטים כלכליים (תועלת משקית, דיור להשכרה מול מכירה, ומודל תמרוץ-פיצוי שיסייע בהחדרת הטכנולוגיה לענף הבנייה בישראל). פרק 9 מסכם את ממצאי המחקר וכולל את המסקנות של צוות החוקרים.

פרק 2: נתוני רקע

על פי הודעה של הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (להלן: ה"למ"ס) מיום 21 למאי 2017: "בסוף שנת 2015 מנתה אוכלוסיית ישראל 8.5 מיליון תושבים. האוכלוסייה צפויה להגיע ל- 10 מיליון תושבים בסוף שנת 2024, ל- 15 מיליון תושבים בסוף 2048, ובסוף תקופת התחזית, בשנת 2065, היא צפויה להגיע ל- 20 מיליון תושבים".

בהמשך ההודעה מובהר גם שהרכב האוכלוסייה צפוי להשתנות, כאשר הגידול העיקרי, של מספר אחוזים, יהיה באוכלוסייה המבוגרת (מעל גיל 65) ובאוכלוסיית הקשישים (מעל גיל 85). לצד שינויים אלה צפויים שינויים בהרכב משקי הבית, הכוללים בעיקר עלייה במספר המשפחות החד-הוריות ועלייה בשיעור הגירושין (ליאורה בר-סלע 2002). ההשלכה של שינויים אלה על משק הבנייה באה לידי ביטוי בתחזית צרכי הדיור, כפי שהיא מבוטאת בטבלה 2.1, הלקוחה מהחלטה מספר דר/131 של וועדת השרים לענייני תכנון, בנייה, מקרקעים ודיור ("קבינת הדיור") מיום 13 לפברואר 2017: תכנית אסטרטגית לדיור (משרד ראש הממשלה 2017), שפורסמה ע"י מזכירות הממשלה בהחלטה מספר 2457(דר/131).

טבלה 2.1: תחזית צרכי הדיור לשנים 2017-2040 (משרד ראש הממשלה 2017, לוח 1)

סה"כ תוספת יח"ד	התקופה					צרכי הדיור (באלפי יח"ד לשנה)
	2036-2040	2031-2035	2026-2030	2021-2025	2017-2020	
כ- 1.5 מיליון	67	65	61	55	52	

במשק הבנייה הנוכחי קיים פער בין הצרכים לבין כושר הייצור.

בשיטות הבנייה הקונבנציונליות, המקובלות בארץ לבניית בנייני מגורים שאינם רבי קומות ("בנייה רוויה"), משקיעים בממוצע כ- 24 שעות-אדם לבניית מ"ר של דירה. בשיטות ה"מתועשות למחצה", הנפוצות בבניינים גבוהים ורבי קומות (המכונות בשם הכוללני "שיטת ברנוביץ"), כמו גם בשיטות הטרומיות שבונים בהן בארץ מעט מאד, משקיעים כ- 20 שעות-אדם למ"ר של דירה, ואילו בבנייה נמוכה ("צמודי-קרקע") משקיעים יותר מ- 30 ש"ע למ"ר.

הנתונים של תשומות עבודה לאותו סוג בנייה אינם שונים מהותית בארץ לעומת מדינות אחרות. לעומת זאת, בחו"ל נהוג גם לבצע בנייה שאינה נמוכה בבנייה קלה עם שלד מעץ, או מפרופילי פלדה דקי דופן, או מפרופילים מעורגלים. בנייה כזו נזקקת פחות לתשומות עבודה, ברם, בישראל היא אינה שכיחה בשלב זה.

רוב תשומות העבודה שהוזכרו לעיל הן במלאכות המכונות "עבודות רטובות" (עבודות עפר, יציקות בטון של ביסוס ושלד, טיח, חיפוי אבן, ריצוף וכיו"ב). עבודות כאלו מתאפיינות, בארבע תכונות, שנהוג לכנותן באנגלית בשם "4D" (Dirty, Difficult, Dangerous, and Dull). בישראל, כמו במדינות אחרות בעלות תל"ג גבוהה לנפש, אין די עובדים מקומיים לענף הבנייה המסורתי (ובמאמר מוסגר – גם אין די עובדים לענפים אחרים בעלי מאפיינים דומים, כמו: חקלאות, מוסכים, וסיעוד). מאחר שאין פתרון פשוט לעניין הפועלים הפשוטים במדינות "עשירות", מה שקורה אצל רובן בפועל, הוא הסתמכות, בין היתר, על "עבודה זרה", היינו – הסתמכות חלקית על עובדים זרים (ובישראל גם עובדים פלסטיניים), לעיתים גם בעלי מעמד שאינו חוקי, אשר מקבלים תשלומים שלעיתים אינם חוקיים לגמרי, וכתוצאה מזה כל ענף הבניין סובל מחוסר וודאות – הן המעסיקים והן המועסקים. זה אינו פתרון בר קיימא.

לעומת זאת, תיעוש ברמה גבוהה של הבנייה, כמו הבנייה המודולרית במיטבה (ורק במיטבה!) מסתמן כפתרון בר קיימא.

משך הבנייה הממוצע של יחידת דיור עומד כיום על כ- 26 חודשים, וכושר הייצור הכללי הוא כ- 50,000 יח"ד לשנה. משרד הבינוי והשיכון הכיר בעובדה שאחד האמצעים לצמצום הפער בין צרכי הדיור לכושר הייצור הקיים הוא הגברת תיעוש הבנייה. במסגרת תוכנית לתיעוש משק הבנייה הישראלי (משרד הבינוי והשיכון 2016) הציב לעצמו משרד הבינוי והשיכון יעדים לגבי מחיר הדירות, משך הבנייה, איכות הבנייה, ופריון העבודה בענף הבנייה, כולל מדדי הצלחה כנתון בטבלה 2.2.

על מנת להשיג את היעדים הללו, הציב לעצמו המשרד מדדי הצלחה של תיעוש הבנייה לפי סוגי הבניינים, כנתון בטבלה 2.3.

טבלה 2.2: יעדי עבודה ומדדי הצלחה (משרד הבינוי והשיכון 2016: טבלה 1)

מדדי הצלחה			פירוט המדד	היעד
2030	2020	2017		
20%	10%	-	צמצום עלויות הבנייה הממוצעות של השלד	מחיר הדירה
16 חודשים	22 חודשים	26 חודשים	משך הבנייה הממוצע של יחידת דיור	משך הבנייה
30%	10%	-	שיעור הירידה בהיקף התקציב הממוצע המוקצה לשלב הבדק	איכות הבנייה
105%	75%	68.5%	שיעור ממוצע פריון העבודה בענף הבנייה מתוך הממוצע במדינות ה-OECD	פריון העבודה בענף הבנייה

כפי שרואים, משנת 2030 ואילך המשרד שואף להגיע לרמת תיעוש של כ- 90% עד 100% בכל הבנייה שגובהה מעל 6 קומות.

על פי הממצאים מהמחקרים בחו"ל, אחד האמצעים הנוחים ביותר להשגת יעד כזה הוא החדרת הטכנולוגיה המתועשת המבוססת על יחידות מודולריות תלת ממדיות מוגמרות במפעל. בבנייה זו, הנקראת בקיצור גם בחו"ל וגם במחקר זה "בנייה מודולרית", היחידות מובאות לאתר עם כל המערכות

וחומרי הגמר שבתוך היחידה, ובאתר מבוצעות רק פעולות חיבור בין היחידות ובין לבין הגרעין, עבודות איטום וחסומים, השלמות לתיאום מערכות, והשלמות גימור (בעיקר בממשקים שבין היחידות). למעט עבודות יציקת בטון הקשורות לגרעין הבניין, יתר העבודות המבוצעות הן בשיטות יבשות בלבד.

טבלה 2.3: מדדי הצלחה של רמות התיעוש (משרד הבינוי והשיכון 2016: טבלה 2)

סוג הבנייה	מצב קיים	מדדי הצלחה		
		2017	2020	2030
רבי קומות ומגדלים	100%	100%	100%	100%
בנייה מרקמית 7-9 קומות	56%	60%	75%	90%
בנייה מרקמית 3-6 קומות	35%	40%	55%	75%
בנייה צמודת קרקע	40%	45%	60%	75%

במחקר שבוצע לקראת סוף המאה הקודמת במכון הלאומי לחקר הבנייה בהזמנת משרד הבינוי והשיכון (ורשבסקי ושות' 1999) נבחנו המכשולים ודרכי ההתמודדות עם הצורך להגביר את התיעוש במשק הבנייה הישראלי. אחת המסקנות וההמלצות העיקריות שהתקבלו הייתה: "לאחר בחינת הנושא, דעת מחברי הדו"ח היא שיש הצדקה ציבורית לקדם, על ידי פעילות ממשלתית יזומה, את הבנייה הטרומית כדי שתוכל לשמש חלופה סבירה ליד סוגי הבנייה האחרים – גם בבנייה למגורים (אשר מהווה כ-70% מכלל הבנייה), וזאת בגלל יתרונותיה הפוטנציאליים למשק הבנייה". טכנולוגיות הבנייה הטרומית ושיטות הבנייה שנסקרו במחקר הנ"ל כללו רמת תיעוש חד ממדית (עמודים, קורות, לוח"דים, מהלכי מדרגות) ודו ממדית (קירות, תקרות בגודל חדר) בלבד. האפשרות של תיעוש מלא, המבוסס על בנייה עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, לא נבחנה במחקר הנ"ל.

מאז פרסום המחקר הנ"ל הזמין משרד הבינוי והשיכון מספר עבודות נוספות (אנגל ושות' 2001, אנגל ושות' 2004, משרד הבינוי והשיכון 2016), אשר בחנו היבטים כלכליים ואחרים של תיעוש הבנייה. אף אחת מהן לא עסקה באפשרות של בנייה מתועשת ברמה גבוהה במיוחד המתאפשרת על ידי יחידות מודולריות תלת ממדיות מוגמרות במפעל.

הסיבה העיקרית להעדר התייחסות לטכנולוגיה מסוג זה בעבודות המוזכרות היא כנראה התפוצה הנמוכה מאוד שלה במשק הבנייה הישראלי, והעדר השימוש בה לבנייה רוויה ובניינים גבוהים ורבי קומות.

לעומת המצב בישראל, בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל מיושמת כיום בבניינים גבוהים ורבי קומות (6 עד 40 קומות) במקומות שונים בחו"ל, כפי שמעיד סקר הספרות

המפורט (תת-פרק א' 13 בנספח א'), ובמרבית הפרויקטים המנותחים בספרות הושגו שיפורים מהותיים וניכרים ביעילות ובפריון, בקיצור משך הפרויקט, ובהפחתת כמויות הפסולת. בהעדר ניסיון מקומי עם טכנולוגיה זו בבנייה לגובה, נדרש מחקר מקדים שיבחן את הפוטנציאל הגלום בה, יתרונות, חסרונות, חסמים וכו', וייתן למקבלי ההחלטות כלים לקבלת החלטות בנושא.

2.1 מראי מקום

ש. אנגל, נ. אנגל, י. קורץ, א. חסון, 2001, "מודל כלכלי- תמחירי של כדאיות המעבר לבנייה מתועשת למגורים". משרד הבינוי והשיכון, האגף למידע וניתוח כלכלי.

ש. אנגל, נ. אנגל, י. קורץ, ש. רזון, 2004, "מדד עומק תיעוש הבנייה למגורים". משרד הבינוי והשיכון, האגף למידע וניתוח כלכלי, מנהל הנדסה וביצוע.

ל. בר-סלע, 2002, "משפחה ודעת, כרך ב', מנחה למנחה מס. 10". משרד החינוך, האגף לחינוך מבוגרים, המחלקה להורים משפחה וקהילה.

א. ורשבסקי, ר. בקר, י. רוזנפלד, 1999, "תיעוש הבנייה – מכשולים ודרכי התמודדות". המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה. מחקר מס. 017-633.

משרד ראש הממשלה, 2017, "תוכנית אסטרטגית לדיור". החלטה מספר 2457 (דר/131).

משרד הבינוי והשיכון, 2016, "תוכנית לתיעוש ענף הבנייה בישראל – מסמך מסכם". משרד הבינוי והשיכון, אגף לתכנון אסטרטגי ומדיניות.

פרק 3: מטרת המחקר

מטרת המחקר הראשית הייתה לבחון את מכלול ההיבטים הקשורים לקידום תיעוש הבנייה הרוויה למגורים בבניינים גבוהים ורבי קומות בישראל על ידי יישום של טכנולוגיה המבוססת על בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות המיוצרות ומוגמרות במפעל. מכלול ההיבטים כולל היבטים הנדסיים ותפקודיים, היבטים אדריכליים, והיבטי ביצוע, ניהול וכלכלת הבנייה. המטרה העיקרית הייתה לבחון ולתעד יתרונות, חסרונות, חסמים, נקודות תורפה, דגשים טכנוניים, דגשים ביצועיים, דגשים ניהוליים, השתלבות במרקם העירוני וכד'.

מטרות משנה כללו השוואה מפורטת בין החלופות הטכנולוגיות השונות של תיעוש באמצעות יחידות תלת ממדיות על פי טיפוס היחידה וחומרי הבנייה הראשיים (למשל: שלד בטון לעומת שלד פלדה או עץ) ואופן ההתקנה והאינטגרציה (למשל: היחידה היא מילואה בלבד בתוך שלד מפלדה או מבטון לעומת בנייה בה שלד היחידה מהווה גם את שלד הבניין).

פרק 4: שיטת המחקר ושלביו

המחקר בוצע, כאמור, על יד צוות בין-תחומי של חוקרים מהאקדמיה וממשק הבנייה, תוך התייעצות עם נציגים של התעשיות הרלוונטיות בישראל, מהנדסים ומנהלים בחברות בנייה גדולות העוסקות בייזום ובביצוע של פרויקטים למגורים, ומנהלי פרויקטים.

המחקר כלל איסוף וסקירה מקיפה וממצה ככל האפשר של הספרות הקיימת בנושא של בנייה מתועשת למגורים עם יחידות מודולריות תלת ממדיות המיוצרות ומוגמרות במפעל.

במקביל נאסף מידע לגבי הטכנולוגיות הרלוונטיות הקיימות בישראל.

על פי הספרות והמצב בישראל בוצע אבחון ואפיון מפורט של טיפוס השיטות הקיימות, תוך התייחסות למבנה היחידה המודולרית, אופן התקנתה וחיבורה, אופן ההשגה של קונסטרוקציה יציבה, והאינטגרציה לבניין שלם מבחינה אדריכלית ותפקודית כוללת.

כדי לבחון נקודות תורפה וחסמים ולברר דרכי התמודדות הופץ שאלון אינטרנטי בקרב הציבור המקצועי והתקיים מפגשי סיעור מוחות עם נציגי תעשיות הבנייה הרלוונטיות בישראל, נציגי חברות קבלניות ויזמיות, ומנהלי פרויקטים. כמו כן נבחן הנושא בהתכתבות עם מומחים מחו"ל.

על בסיס הממצאים מהספרות וכל הפעילויות הנ"ל, וכן על סמך ידע אישי של צוות המחקר בוצע ניתוח שיטתי של ההיבטים ההנדסיים, אדריכליים, ביצועיים, וניהוליים של טיפוס השיטות, תוך התייחסות ליתרונות, חסרונות, חסמים וכד'. כמו כן בוצע ניתוח כלכלי ראשוני של אפשרות היישום של טכנולוגיה זו בישראל.

בסופו של הניתוח המפורט הוסקו מסקנות לגבי פוטנציאל היישום בבנייה רוויה למגורים, ההישגים הצפויים, החסמים העיקריים ואופן ההתמודדות המומלץ.

שלבי המחקר ותפוקותיהם כללו:

א. סקר ספרות, שנמשך לכל אורך תקופת המחקר על מנת להבטיח שהוא מעודכן עד למועד הבאת הדו"ח לדפוס.

ב. איסוף מידע מקומי באמצעות שאלון ליצרנים, סיורים במפעלים קיימים, וניתוח תמציתי של הטכנולוגיות הקיימות בישראל.

ג. אבחון המצב הקיים בעולם, וסיכום תמציתי של הידע המצטבר, כולל אבחון, מיון ואפיון מפורט של השיטות הטיפוסיות לטכנולוגיה הנדונה. האפיון מתייחס הן למבנה היחידה המודולרית והן לאופן ההתקנה, החיבור והאינטגרציה לבניין מגורים שלם.

ד. סקר עמדות באמצעות שאלון אינטרנטי שהופץ לציבור המקצועי.

ה. מפגש סיעור מוחות עם מהנדסי התעשיות הרלוונטיות בישראל (השתתפו נציגי התעשיות הבאות: אלקטרה בנייה, אפקון, אקרשטיין, אשקריט, היחידה בנייה מתועשת, ישראלמרין, מייטק ישראל, מנרב פלדה, סקייילין עגורנים, פורטה-פרו לטביה, רמט-טרומ), מנהלים ומהנדסים של חברות

יזמיות וקבלניות (השתתפו נציגי החברות הבאות: אשטרם, סולל בונה, עץ השקד הנדסה),
ומהנדסים ומנהלי פרויקטים (השתתפו נציגי החברות הבאות: אחים מרגולין, התאחדות בוני הארץ,
יוניב, מנהל התכנון במשרד הבינוי והשיכון).

ו. ניתוח שיטתי של ההיבטים ההנדסיים, אדריכליים, ביצועיים וניהוליים של טיפוסי השיטות, תוך
התייחסות ליתרונות, חסרונות, חסמים וכד', כולל ניתוח כלכלי ראשוני של אפשרות היישום
בישראל.

ז. הסקת מסקנות לגבי פוטנציאל היישום בבנייה רוויה למגורים בישראל, ההישגים הצפויים, החסמים
העיקריים ואופן ההתמודדות.

ח. סיכום הממצאים והכנת דו"ח המחקר.

פרק 5: תמצית סקר הספרות

במסגרת המחקר בוצע סקר ספרות מקיף שכלל יותר מ-150 מקורות. היות ומחקר זה הינו ראשון מסוגו בישראל, הוחלט לכלול את כל הסקר המפורט במסגרת דו"ח זה, אך על מנת לא להפריע לרצף הקריאה, הסקר המפורט כלול בנספח א' שבסוף הדו"ח. הנספח כולל 14 תתי-פרק, לפי הנושאים הבאים:

- א-1. היבטים כלליים של תיעוש בנייה
- א-2. תיאור כללי של בנייה עם יחידות מודולריות תלת ממדיות
- א-3. היבטים אדריכליים
- א-4. היבטים מבניים (קונסטרוקציה)
- א-5. שיטות בנייה והיבטים טכנולוגיים
- א-6. היבטים של תפקוד פיסי וקיימות
- א-7. מערכות בבנייה מודולרית
- א-8. היבטים של תהליך ובקרת הביצוע
- א-9. היבטים כלכליים של בנייה מודולרית
- א-10. יישום BIM בתהליכי הבנייה
- א-11. היבטים רגולטוריים
- א-12. מקרי בוחן
- א-13. בנייה במכולות
- א-14. מדריכים וספרים

כל פרק בנספח סוקר בדרך כלל כל מקור בנפרד לפי סדר כרונולוגי של התפתחות הספרות בנושא הפרק, וכולל בסופו את רשימת הספרות לפי סדר א"ב.

בפרק הנוכחי נתון סיכום תמציתי של הסקר, הכולל בעיקר את עיקרי הממצאים והמסקנות שהתקבלו ממנו. הסיכום להלן הוא על פי 6 כותרות ראשיות:

- בנייה מודולרית – מהי?
- מאפייני הבנייה המודולרית
- הניסיון המצטבר בבנייה המודולרית לגובה
- יתרונות וחסרונות של בנייה מודולרית
- היבטי תכנון, ביצוע, וניהול פרויקטים ייחודיים לבנייה מודולרית
- היבטים כלכליים בבנייה מודולרית.

תחת כל כותרת בסיכום להלן קובצו ממצאים מכל תתי-הפרק הרלוונטיים בנספח. כדי לא להפריע לרצף הקריאה, התמצית אינה מאזכרת מחדש את המקורות ואינה חוזרת על רשימת הספרות בסופה.

5.1 בנייה מודולרית – מהי?

המונח "בנייה מודולרית" מוגדר באתר של המכון לבנייה מודולרית MBI בארה"ב (Modular Building Institute - MBI) באופן הבא:

Modular construction is a process in which a building is constructed off-site, under controlled plant conditions, using the same materials and designing to the same codes and standards as conventionally built facilities – but in about half the time. Buildings are produced in “modules” that when put together on site, reflect the identical design intent and specifications of the most sophisticated site-built facility – without compromise.

בהמשך להגדרה זו, שמתאימה לכאורה לכל הבנייה הטרומית המבוססת על רכיבים מיוצרים במפעל ומובאים לאתר לצורך הרכבה וחיבור בלבד, יש להבחין בין בנייה טרומית המורכבת מיחידות מודולריות חד (קורות ועמודים) או דו ממדיות (קירות ותקרות) לבין בנייה טרומית עם יחידות תלת ממדיות (תאים הכוללים בדרך כלל רצפה תקרה וארבעה קירות). בנוסף לכך מבוצעת הבחנה בין יחידות תלת ממדיות הכוללות רק שלד, לבין יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל הכוללות גם את כל חומרי הגמר והמערכות הכוללים ביחידה.

במדיונות אירופה ואמריקה הבנייה הטרומית מהסוגים הראשונים (חד, דו או תלת ממדית שכוללת שלד בלבד ואינה כוללת חומרי גמר ומערכות) מופיעה בדרך כלל תחת הכינוי “Prefabricated Construction”, אשר מתאים בעברית למונח "בנייה טרומית", בעוד שלבנייה מהסוג האחרון (זו שכוללת יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל) מייחדים את השם Modular Construction. מעידות על כך העובדות הבאות: (1) הארגון האמריקאי הנ"ל עוסק בבנייה זו בלבד ולא בכל סוגי הבנייה הטרומית, (2) הפרויקט האירופאי MODCONS,

(MODular CONStruction), אשר פעל במסגרת המחקרים הכלל אירופאיים FP7-SME במשך 3 שנים, מ-2013 עד 2015, עסק אך ורק בבנייה מהסוג הזה.

בסינגפור ובאוסטרליה, במסגרת מבצעים ייעודיים לתיעוש הבנייה, ובעיקר זה שנקטה רשות הבנייה של סינגפור, בנייה מסוג זה מקודמת כעת באופן פרואקטיבי, והכינוי לו היא זוכה, PPVC – Prefabricated Prefinished Volumetric Construction, מבטא בצורה מדויקת יותר את מהותה.

בישראל נהוג לייעד את המונח "בנייה טרומית" לטכנולוגיות בנייה המבוססות על רכיבי שלד מבטון, מבטון מזוין, או מבטון דרוך המיוצרים במפעל. בנייה טרומית עם שלד המבוסס על יחידות תלת ממדיות מבטון ידועה בארץ תחת הכינוי "אשקוביות", שנובע אמנם משמו של מפעל אשקובית אך משתמשים בו גם לבנייה כזו של מפעלים אחרים. המונח "בנייה מודולרית" פחות מוכר, ונמצא בשימוש בעיקר

בשם ובחומר הכתוב של מספר חברות בודדות המייצרות יחידות תלת ממדיות עבור בניינים נמוכים בבנייה קלה.

המחקר הנוכחי עוסק, כאמור, בבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, ולצורך הבהירות של הדו"ח בכל מקום שמופיע בו המונח "בנייה מודולרית" ללא הבהרות נוספות הכוונה היא לבנייה מסוג זה בלבד, בעוד יתר הסוגים מכונים "בנייה טרומית".

5.2 מאפייני הבנייה המודולרית

5.2.1 אפיון לפי אופי המבנה הכולל

מבחינת אופי הבנייה הכוללני מבחינים בארבעה טיפוסים עיקריים של הבנייה המודולרית, הנובעים מההתנהגות המבנית של השלד, ומהיכולת שלו להעביר עומסים אנכיים וכוחות אופקיים:

א. בנייה בערימה (ללא גרעין הקשחה) – כשהבניין הוא נמוך יחסית (בדרך כלל פחות משבע קומות) ניתן לעיתים להסתפק בהערמה של היחידות התלת ממדיות זו על גבי זו וזו לצד זו על פי התוכנית האדריכלית, ובחיבורן בפינות או בנקודות השענה נוספות (אם קיימות), ולהעביר את כל הכוחות, הן האנכיים והן האופקיים, באמצעות השלד ומערכות ההקשחה של היחידות התלת ממדיות והחיבורים ביניהן. במקרים אלה אין צורך בגרעין הקשחה, ובדרך כלל אין עבודות מהסוג של בנייה קונבנציונלית באתר הבנייה.

ב. בנייה בערימה עם גרעין הקשחה – בבנייה מודולרית לגובה המצב השכיח ביותר הוא של בנייה עם יחידות תלת ממדיות הנערמות זו על גבי זו על פי התוכנית האדריכלית, מחוברות זו לזו על פי פרטי החיבור המבניים, ונקשרות לגרעין מרכזי מבטון יצוק באתר (ולעיתים רחוקות מבטון טרום או מפלדה). בבנייה זו הכוחות האנכיים מועברים באמצעות שלדי היחידות. הכוחות האופקיים מועברים באמצעות מערכת ההקשחה של היחידות והחיבורים בין היחידות אל הגרעין, שהוא המרכיב העיקרי בקשיחות האופקית של המבנה הכולל.

ג. בנייה עם גרעין הקשחה הכולל מערכת הקשחה במרווחים שבין היחידות – בבניינים גבוהים במיוחד יש לעיתים צורך להוציא מן הגרעין המרכזי רכיבי הקשחה נוספים העוברים במרווחים שבין היחידות ולהשחיל את היחידות ביניהם (כפי שעשו בבניין Dean461 בברוקלין שהוא בן 32 קומות). היחידות במקרה זה נערמות זו על גבי זו, ומחוברות ביניהן ואל רכיבי ההקשחה. הכוחות האנכיים מועברים באמצעות שלדי היחידות והכוחות האופקיים באמצעות מערכת ההקשחה והגרעין המרכזי.

ד. בנייה עם שלד נושא והשחלה של יחידות תלת ממדיות לא נושאות ("בניין מגירות") – כאשר, בגלל גובה הבניין, אין כבר אפשרות להעביר את הכוחות האנכיים באמצעות שלד היחידות, הבניין מבוסס על מבנה קונבנציונלי הכולל שלד מלא עם הקשחות אופקיות ורצפות נושאות, בעוד שהיחידות

המתועשות אינן נושאות כלל ומושחלות כמו מגירות (Capsules) אל תוך השלד כתחליף לביצוע מחיצות, קירות מסך, ריצוף, העברת צנרות וחיווט, ועבודות גמר בשיטות קונבנציונליות באתר.

באופן בלתי תלוי בטיפוס המבנה הכולל, היחידות המיוצרות במפעל הן, כאמור, תלת ממדיות וכוללות את כל רכיבי השלד, הרצפה, התקרה, הקירות, והמחיצות הפנימיות שבתוך היחידה כשכולם מוגמרים לחלוטין, כולל חומרי הבידוד התרמי והאקוסטי, מחסומי אוויר, מעכבי אדים, וכד', בהתאם למיקום האלמנט ופרטי התכנון. במפעל מתקינים גם את כל הצנרת והחיווט העוברים בתחום היחידה, מתגים, קופסאות ביקורת, כלים סניטריים, וכד', ואת כל מערכות האיטום הפנימיות בחדרי רחצה ובמקומות אחרים הנדרשים על פי התכנון. בקירות החוץ מותקנים כבר במפעל החלונות והתריסים. בקירות פנים ישנם פתחים עבור מעברים ודלתות בין חללים שביחידות סמוכות, בהתאם לתוכנית האדריכלית, כך שבאתר צריך יהיה להתקין רק את רכיבי ההסתרה הסופיים של מסגרת הפתח או משקוף הדלת. במפעל מבוצעות גם עבודות האיטום החיצוני, כולל איטום בפני מי גשם למהלך ההובלה וההרכבה, עבודות הצבע על הקירות והתקרה, וריצוף הרצפה, למעט השלמת הריצוף במעברים בין יחידות שתבוצע באתר. במרבית המקרים מאחסנים בתוך היחידות את החומרים והרכיבים הדרושים להשלמה במעברים שבמפגשים בין יחידות, הדלתות וריהוט קבוע ששייך ליחידה, כך שחוסכים הובלות לבניין לצורך השלמתו.

לגבי גמר חזיתות ישנן שתי אפשרויות שכיחות:

(1) היחידה המוגמרת במפעל כוללת גם את מערכת הגמר הסופי הדקורטיבי של החזית, ואז היא כוללת את כל פרטי הגמר הסופיים של בידוד תרמי מניעת גשרים תרמיים, מערכת איטום למים סופית, ורכיבי גמר דקורטיביים. באתר מבוצעים במקרה זה רק חיבורים בין היחידות ובינן לבין הגרעין המרכזי, חיבורים של מרכיבי מערכות השירות היוצאים מהיחידה אל החלקים המשותפים העוברים בגרעין (פעולות שנעשות בדרך כלל דרך הגרעין בלי שיהיה צורך להיכנס אל תוך היחידה), התקנה של מחסומי אש סביב פתחים עוברים בין היחידות ובמפלס התקרות בין היחידות, איטום למים במישקים שבין היחידות, ואיטום סופי של גג הבניין.

(2) היחידה הסופית אינה כוללת את הגמר הסופי של החזיתות. בגישה זו אפשר למעשה לשוות לבנייה המודולרית מראה שאינו משקף את מהותה הטכנולוגית, לייצר חזות מרשימה בלתי מוגבלת, ולהתגבר מבחינה זו על מכשולי הסטיגמה של הבנייה המתועשת. כמות העבודות הנדרשת באתר כמובן רבה יותר ובדרך כלל יש צורך בפיגומים מלאים לביצוע החזיתות. העבודה באתר כוללת במקרה זה (בנוסף לחיבורים בין היחידות ובינן לבין הגרעין המרכזי, חיבורים של מרכיבי מערכות השירות היוצאים מהיחידה אל החלקים המשותפים העוברים בגרעין, התקנה של מחסומי אש סביב פתחים עוברים בין היחידות ובמפלס התקרות בין היחידות, איטום למים במישקים שבין היחידות, ואיטום סופי של גג הבניין) התקנה של שכבת הבידוד התרמי החיצונית למניעת גשרים תרמיים, איטום למים של החזיתות, התקנה של מערכת הגמר הדקורטיבית, והשלמות סביב פתחי חלונות.

5.2.2 אפיון מידות היחידות

המידות של היחידות המודולריות מוגבלות עקב אילוצי שינוע המשפיעים בעיקר על רוחב מרבי חיצוני של היחידה, ומשקל מרבי הנובע מכושר הרמה של עגורנים. ברוב המדינות מבנה הדרכים מאפשר יחידות ברובם גדול מ- 3 מ', אך לא גדול יותר מ- 3.5 מ'. בישראל לפי תקנות התעבורה ניתן להוביל יחידות שרוחבן המרבי 3.4 מ' ללא צורך בליווי כלשהו למעט סימון תקני על גבי המובל. גובה היחידות מותאם בדרך כלל לגובה הפנימי המינימלי או המתוכנן של החלל השימושי ומגיע לכ- 2.8 מ' עד 3.5 מ' כתלות במבנה, בחומרים ובגובה הפנימי. בכל מקרה מידה זו היא קטנה יחסית ואינה מגבילה את השינוע בדרכים רגילות ומתחת לגשרים רגילים. כושר ההרמה המרבי של עגורני צריח המקובלים בבנייה מאפשר הרכבה של יחידות במשקל של עד כ- 40 טון לגובה של 120 מ' עם רדיוס עבודה של 40 מ'. המשקל המרבי משפיע על אורך היחידה בהתאם לחומרים מהם היא עשויה.

5.2.3 אפיון לפי חומרי היחידות

מבחינת חומרי היחידות המודולריות, מבחינים בין יחידות כבדות המיוצרות עם שלד מבטון, ויחידות קלות המיוצרות עם שלד מפלדה או מעץ.

יחידות עם שלד מבטון מיוצרות באורך קטן יותר מהאחרות בגלל המשקל הכולל הגדול שלהן. האורך המרבי שלהן הוא בדרך כלל כ- 6 מ', ולכן הן יכולות לכלול או 2 חדרים קטנים, או חדר גדול ומסדרון, או חדר גדול וחדר רחצה/שירותים. משקלן המרבי נקבע בדרך כלל בהתאם לכושר הנשיאה של העגורן המיועד. על מנת להקטין את המשקל של יחידות מבטון, ו/או לאפשר יחידות ארוכות יותר, נהוג לבצע רק את רכיבי השלד האנכיים והרצפה מבטון, בעוד שיתר החלקים (מחיצות, מילואות קיר, קירות חוץ, תקרות) מבוצעים בצורה דומה למתואר להלן עבור הבנייה עם שלד מפלדה.

יחידות עם שלד מפלדה מיוצרות באורך גדול בהרבה, שמגיע עד כ- 16 מ', ומשקלן מגיע עד כ- 12 טון. יחידות אלה יכולות לכלול מספר חדרים מסוגים שונים, מסדרונות וכיו"ב. רכיבי השלד עשויים או מפרופילי צינור מרובע ופרופילי U מפלדה מעורגלת בחם או מפרופילים דקי דופן מפלדה מעוצבת בקר, הכל בהתאם לאופי המבנה, כמובהר בסעיף 5.2.4.

מחיצות בתוך היחידה, חלקי קיר שאינם נושאים בין יחידות, קירות חוץ, ותקרת היחידה עשויות לרוב מזקיפי פח מעוצב בקר עם חיפוי של לוחות גבס בצד הפנימי ולוחות צמנטיים בצד החוץ שעלול להיחשף לרטיבות.

במדינות בהן נהוג לבצע בבנייה הרגילה רצפות קלות (כגון בארה"ב), היחידות כוללות רצפה מפרופילי פלדה עם לוחות תשתית מלבידים עמידים במים וריצוף שטיח או פ.ו.ו.סי. כאשר הבנייה הרגילה מבוססת על רצפות קשיחות, השימוש ברצפות קלות עלול להוות חסם בגלל תחושת התנודה הקלה שרצפות כאלה בעת הליכה עליהן, ונהוג לבצע את רצפת היחידה מבטון קל על גבי סיפון זיון מפח פלדה דק מעוצב בקר.

הבידוד התרמי והאקוסטי שבין הזקיפים עשויים מצמר מינרלי שמוחדר בקלות וממלא היטב את מלוא תחום המרווח שבין הזקיפים והלוחות.

יחידות עם שלד מעץ קלות עוד יותר מאלה המיוצרות מפלדה, אך, בגלל הגבלות החלות במדינות שונות על בנייה לגובה עם שלד מעץ, הן משמשות לבנייה של בניינים נמוכים בלבד (לרוב כ- 1 עד 2 קומות), ובבנייה גבוהה יותר רק כיחידות מושחלות (מגירות) שאינן נושאות.

5.2.4 אפיון לפי מבנה היחידות

מבחינים בין יחידות נושאות ושאין נושאות.

יחידות שאינן נושאות משמשות כיחידות מושחלות בבנייני "מגירות" בלבד, וניתן לבצע אותן מכל חומר ובכל טכנולוגיה שמאפשרים עמידה במכלול הדרישות התפקודיות והתקנים החלים על רכיבים שאינם נושאים.

יחידות נושאות מבטון כוללות בדרך כלל עמודים ורצפה מבטון מזוין, או קירות נושאים ורצפה מבטון מזוין. כדי למנוע משקל גדול יתר על המידה התקרות הן בדרך כלל קלות ודקורטיביות בלבד (וכוללות לרוב גם מערכת ההגנה בפני רטיבות המיושמת עליהן למהלך ההובלה וההרכבה באתר).

יחידות נושאות מפלדה מבוצעות משני סוגים:

(1) **יחידות עם סמכים רציפים וקירות נושאים** מסוג LWSF – Light Weight Steel Frame, המבוצעים מפרופילי פח דקי דופן מעוצבים בקר עם אלכסונים שטוחים להקשחה אופקית. ביחידות אלה ההשענה היא ברציפות של קיר על גבי קיר ורצוי ככל האפשר לכל אורך הקיר עם אפשרות לזיזים קצרים בקצה היחידה. גודל הפתחים האפשריים ביחידות כאלה מוגבל. יחידות מסוג זה מתאימות בדרך כלל לבנייה של עד כ- 6 קומות בלבד. יחידות עם סמכים נושאים מתקבלות גם כאשר מבצעים את הבנייה המודולרית באמצעות מכולות ימיות שהוסבו למטרת בנייה. יחד עם זאת, בגלל הרוחב המוגבל של יחידות אלה (רוחב נטו בתוך היחידה שאינו עולה על כ- 2.2 מ'), השימוש בהן למטרות בנייה למגורים מוגבל מאוד, ומסיבה זו הדו"ח הנוכחי לא עוסק בבנייה במכולות.

(2) **יחידות עם סמכים נקודתיים** מתחת ומעל לעמודים בדלים לאורך קירות היחידה. העמודים עשויים בדרך כלל מפרופילי צינור מרובע, כאשר הם חייבים לעבור ברציפות לכל גובה המבנה. מילואות הקיר בין העמודים אינן נושאות, למעט הקשחות לכוחות אופקיים שיש למקם לפי התכן המבני. ביחידות אלה ניתן לבצע בדרך כלל פתחים גדולים בין יחידות סמוכות, כולל יצירת חלל פתוח רחב המורכב משתי יחידות או יותר.

5.3 הניסיון המצטבר בבנייה מודולרית לגובה

הניסיון לקדם תיעוש בבנייה, במובן של ייצור רכיבים גדולים יחסית במפעל ייעודי והרכבתם במקומם הסופי בבניין שבאתר הבנייה, נדון בספרות המקצועית לאורך שנים ארוכות, והחל לצבור עניין למעשה

כבר מראשית המאה ה-20. יחד עם זאת, ההתפתחות המעשית המואצת החלה אחרי מלחמת העולם השנייה, עם הצורך לשקם אזורים אורבניים גדולים מאוד באירופה, בברה"מ, במדינות הגוש הקומוניסטי דאז, וביפן, ולבנות הרבה מאוד יחידות דיור לרבות בני אדם שנותרו ללא קורת גג בגלל ההרס הרב שהמלחמה זרעה. המניע העיקרי לתיעוש היה אז הצורך להתגבר על משך הבנייה הארוך בבנייה קונבנציונלית שמתבצעת כולה באתר. רוב הבנייה המתועשת באותה תקופה התבססה על שלד מבטון מזוין, בו מייצרים במפעלים יחידות דו ממדיות של קירות נושאים, תקרות בגודל חדר, מחיצות, וכד', וכן רכיבים ליניאריים של לוחות חלולים דרוכים (לוח"דים), עמודים, קורות, לינטלים, מעקות, מהלכי מדרגות, וכד'. באותה תקופה החל גם היישום של בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מבטון, אך הן היו קטנות וכבדות מאוד, כללו שלד בלבד ולא היו מוגמרות במפעל.

בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל יושמה בבנייה נמוכה כבר מסוף המאה ה-19. אך בבנייה לגובה החל יישום בקנה מידה מעשי רק בסוף שנות ה-60 של המאה ה-20, וזה בעיקר בברית המועצות, כשהבנייה מבוססת על יחידות מבטון. באותה תקופה נעשו גם ניסיונות ליישם בנייה מודולרית ייחודית מבטון א. בפרויקט הביטט שתוכנן ע"י האדריכל הקנדי-ישראלי משה ספדי במונטריאול קנדה, אשר כלל מבנן של 158 דירות שבחלקים שונים שלו הוא בן כ-8 קומות, ו-ב. בבנייה מהסוג של "בניין מגירות Capsule Tower" בפרויקט של האדריכל היפני קישו קורקווה בטוקיו יפן, אשר לא הצליח, בעיקר בגלל התפיסה האדריכלית-סוציולוגית שיושמה בו (מבנה שלד עם מגירות מאוד קטנות שכל אחת משמשת כדירה קטנטונת, המהווה למעשה תא שינה ל"אורח ללילה"). רק בשנים האחרונות של המאה ה-20 וראשית שנות האלפיים החל יישום נרחב יותר של בנייה מודולרית בבנייה רוויה. בנייה מודולרית לגובה יושמה עד כה במדינות רבות בכל היבשות, עם ניסיון מצטבר גדול במיוחד ברוסיה (מבנים רבים בני 16 קומות ובית מלון בן 30 קומות), אנגליה (מבני מגורים, בתי מלון ומעונות סטודנטים כאשר המבנה הגבוה ביותר עד כה הוא בן 29 קומות), ארה"ב (בתי מלון ומגורים, כאשר הבניין הגבוה ביותר הוא בן 32 קומות), סין (עד 30 קומות), יפן (בדרך כלל בנייה נמוכה בלבד, אך כבר ב-1970 נבנה בניין המגירות שהוא בן 13 קומות), סינגפור (בנייני מעונות, מגורים ובתי מלון, כאשר הבניין הגבוה ביותר הוא בן 40 קומות) ואוסטרליה (עד 29 קומות). בישראל לעומת זאת בנייה מסוג זה יושמה כמעט ורק בבנייה נמוכה (1 עד 2 קומות).

הביקוש הגובר ליחידות דיור למגורים, לעומת המשאבים המוגבלים של תעשיית הבנייה לספק ביקוש זה, אינו נחלת שוק הבנייה הישראלי בלבד, והספרות מראה שבמספר מדינות מושקעים מאמצים לעודד ולקדם את הבנייה המודולרית:

- באוסטרליה הצטבר ניסיון מועט במספר פרויקטים בהם התגברו על בעיות של מחסור בכוח אדם וזרזו את תהליך הביצוע של הפרויקט, ועל מנת לעודד המשך יישום בקנה מידה רחב יותר הוכן מדריך בנושא למתכננים ומבצעים ע"י אוניברסיטת מונאש.
- באירופה הצטבר גם כן לאחרונה ניסיון חיובי, בעיקר בבריטניה, אשר הוביל לריכוז פרויקט רב משתתפים בן 3 שנים, MODCONS, שבוצע במסגרת תוכנית המחקר FP7. בפרויקט זה סקרו

בפירוט רב מספר ניכר של בניינים נמוכים, גבוהים ורבי הקומות שנבנו בשנים האחרונות, והכינו מדריכים עבור אנשי המקצוע במספר תחומים (אדריכלות, מבנים, קיימות, אקוסטיקה). לצד זה הוכן גם באירופה מסמך הנחיות, ETAG24, המשמש בסיס לבחינה של היחידות התלת ממדיות ולמתן אישור מסוג ETA (European Technical Assessment).

- בבריטניה הממשלה הזמינה מחקר מחוקר בשם Mark Farmer, שהוא מנכ"ל של חברת ייעוץ בנושא בנייה ונדל"ן, על מנת להציע פתרונות למחסור בכוח אדם בשוק הבנייה. אחת ממסקנותיו העיקריות, לצד הכורח בהחדרת חדשנות, היא שעל הממשלה להוביל מהלך לקידום הבנייה המודולרית.
- בארה"ב התאגדו יצרני הבנייה המודולרית תחת המטרייה של המכון לבנייה מודולרית MBI, והוא הציב לעצמו מטרה להגביר את היישום של טכנולוגיה זו מ- 2.9% בשנת 2015 ל- 5% בשנת 2020.
- בסינגפור המחסור בכוח אדם בבנייה חריף במיוחד בגלל רמת ההשכלה הגבוהה במיוחד של אנשים צעירים ורצונם לפנות לעבודות בתחום ההייטק והפיננסים. רשות הבנייה של סינגפור נוקטת לפיכך, כבר משנת 2014 בפעילות פרואקטיבית של החדרת תיעוש ברמה אינטנסיבית, תחת הכותרת: DfMA – Design for Manufacturing and Assembly. החל משנת 2019 היא מחייבת לבצע 35% מהבנייה של בנייני מגורים בבנייה הציבורית בבנייה מודולרית, וגם כאשר זו אינה מיושמת, נדרש ש- 100% של חדרי הרחצה והשירותים יבוצעו מיחידות מודולריות תלת ממדיות. הרשות הכינה מערכת תמיכה והסדרה שיטתית להחדרת הטכנולוגיה, כולל מדריך מאויר לאנשי המקצוע.

בזכות אופיו הגלובלי של המשק העולמי בשנים האחרונות והתפתחותה המואצת של בנייה מודולרית במהלך אותה תקופה, מפעלים גדולים לייצור היחידות המודולריות התפתחו לא רק במדינות בהן היישום גבוה, אלא גם במדינות עם כושר ייצור מתקדם וכוח עבודה זול יחסית, כגון, סין, פולין, לטביה, המייצאות את היחידות למדינות אחרות בהן מתבצעת ההרכבה. בחלק ניכר של הפרויקטים המדווחים בספרות, היחידות הובלו ממפעלים מרוחקים לאתרי הבנייה, כולל הובלה באניות מסין לאוסטרליה ומאירופה לארה"ב. בסינגפור הסדירו מערכת שיטתית ייעודית לבחינה ולאישור של שיטות בנייה בטכנולוגיה זו, אשר כוללת את כל הכללים החלים על יצרנים מחו"ל שמעוניינים לשווק את היחידות לסינגפור, כולל תהליכי אישור השיטות הספציפיות ותהליכי בקרה האיכות במפעל על מנת להבטיח את התאמת המוצרים לשוק הבנייה בסינגפור.

במרבית הפרויקטים המדווחים בספרות, ההישג העיקרי של הבנייה מודולרית הוא קיצור משך הביצוע של הפרויקט הכולל. קצב ההרכבה של היחידות התלת ממדיות המדווח בשכיחות הוא כ- 6 עד 10 יחידות ליום, כתלות בעונה השנה ובהתקדמות הפרויקט. קיצור משך הפרויקט הכולל המדווח בשכיחות הוא כ- 40% לעומת הבנייה הקונבנציונלית. להלן מספר דוגמאות: ברוסיה חברת OBD, המייצרת ובונה עם יחידות מבטון, מסיימת בניין טורי של 16 קומות עם 3 כניסות תוך כחודש אחד

בלבד. באוסטרליה סיימו ב- 5 ימים בניין קטן, בן 9 קומות שכלל כ- 4 יחידות תלת ממדיות לקומה. חברת CitizenM הדנית, קבלה החלטה אסטרטגית שהיא בונה מעתה והלאה את כל בתי המלון שלה בעולם בטכנולוגיה זו בגלל משך הביצוע הקצר שנהנתה ממנו בבנייה של מספר בתי מלון באנגליה (בית מלון בן 6 קומות עם 192 חדרים הסתיים תוך 9 חודשים, מהם הרכבת היחידות לקחה 5 שבועות בלבד).

הישגים נוספים המדווחים בשכיחות בכל הספרות ומוצגים כיתרונות מהותיים של הבנייה המודולרית הם: הפחתה ניכרת בכוח האדם באתר, הפחתת פסולת בנייה באתר, הפחתת אספקות לאתר, והפחתה בהסעות של כוח אדם וחומרים לאתר. יחד עם זאת, רק במאמר אחד דווחו ערכים מדודים שאמינותם גבוהה יחסית, והם עומדים שם על 75%, 90%, 60%, ו-70%, בהתאמה.

5.4 יתרונות וחסרונות של הבנייה המודולרית

כמעט כל המאמרים ודוחות המחקר העוסקים בבנייה מודולרית מונים רשימה ארוכה של יתרונות מהותיים של הטכנולוגיה. במרבית המסמכים הללו, הרשימה מוגשת כהצהרה מובנת מאליה של המחבר, ואינה מגובה בהוכחות, השוואות, מדידות, או בערכים כמותיים המעידים על מובהקות ההצהרה. כמו כן קיים מספר קטן של מחקרים, שבוצעו בקרב אנשי מקצוע, המדווח על עמדות של אנשי מקצוע בדבר יתרונות, חסרונות וחסמים, וכולל בדרך כלל ניתוח סטטיסטי לגבי סדר הפריטים ברשימות הללו. גם אלה, ובדומה להם הממצאים מהשאלון שהופץ במסגרת המחקר הנוכחי ומדווח במפורט בסעיף 7.1 להלן, אינם כוללים הוכחות כמותיות לגבי העמדות המדווחות. הנחות היסוד במקרים אלה הן: (1) שאנשי המקצוע מבססים את תשובותיהם על ניסיון מצטבר, ולכן יש ביסוס מעשי לעמדות המובעות על ידם, ו- (2) שכאשר עורכים רשימות כאלה על פי ניתוח סטטיסטי של תשובות שמתקבלות מקבוצה מספיק גדולה של משיבים, ערכי תמיכה גבוהים בתשובה כלשהי מעידים על תמימות דעים מקצועית ולכן גם מעידים, כנראה, על "נכונות" התשובה.

לצד כל אלה ישנם מספר זעום של מקורות שמדווח על מדידות שנעשו בפועל, בדרך כל בפרויקט בודד, של מדדים המצוינים כיתרונות. היות שפרט לאחד (המחקר האירופאי MODCONS), יתר מחקרים אלה לא כוללים השוואות מסודרות ושיטתיות לבנייה פוטנציאלית של אותו בניין בטכנולוגיות אחרות, קשה מאוד להתייחס לערכי החיסכון המדווחים כמדויקים. יחד עם זאת, היות שמדובר בדרך כלל על עשרות רבות של אחוזי חיסכון, ברור לחלוטין שהערכים הם ניכרים.

להלן עיקרי הממצאים לגבי **יתרונות הטכנולוגיה**, כאשר הרשימה עצמה מבוססת על סקרי עמדות בעוד שהערכים הכמותיים בה מצוטטים רק ממחקרים בהם דווח בפירוש על מדידות של המדד הנדון:

- קיצור ניכר של משך הביצוע באתר ושל משך הפרויקט כולו (מדווח על קיצור של כ- 40% בפרויקט ספציפי, בעוד שלפי פרויקט MODCONS מדובר בקיצור של כ- 55% עד 65% כשהיחידות נושאות וכ- 35% עד 45% כשהיחידות מושחלות לתוך שלד קונבנציונלי);

- שליטה בתהליך ובאיכות, הפחתת הטעויות בבנייה ושיפור איכות הבנייה;
- חיסכון בכוח אדם והגברת הפרייון (מדווחת הפחתה של 75% בכוח אדם באתר ספציפי, ולפי פרויקט MODCONS מדובר רק בכ- 50% אך גם זה משפר לדברי המחברים את הפרייון פי 3 עד 4);
- הגברת הבטיחות בעבודה ובעיקר באתר הבנייה (מדווח על הפחתה של כ- 80% בתאונות באתר, ולפי פרויקט MODCONS מדובר בהגברת הבטיחות פי 3 עד 4 למשך כל הפרויקט);
- הקטנה ניכרת של השפעת הבנייה על הסביבה, בעיקר מבחינת צמצום פסולות וההפרעה של רעש וזיהום אוויר בסביבת אתר הבנייה (מדווחת בפרויקט ספציפי הפחתה של כ- 90% בפסולות בניין באתר, כ- 60% באספקות לאתר, וכ- 70% של הסעות עובדים וחומרים לאתר. ערכים אלה דומים מאוד למדווח בפרויקט MODCONS);
- שיפור מהותי בתנאי העבודה של העוסקים במלאכה.

בנושא האקוטי של כוח אדם העוסק בעבודות רטובות בבנייה הקונבנציונלית, היתרונות העיקריים של הבנייה המודולרית הם:

- א. הקטנה ניכרת של הדרישה לתשומות של שעות-אדם באתרי הבנייה.
- ב. שיפור במידה ניכרת את ארבעת ה"ד": כי העבודה היא פחות מלוכלכת, פחות מפרכת, פחות מסוכנת ופחות משעממת.
- ג. יתר-על-כן, הואיל ומצליחים להשיג יותר תפוקה בפחות שעות-אדם, ובאיכות משופרות, ועם פחות ליקויים ופחות "עבודה נשנית" (Re-Work), אפשר לשלם לעובדים כאלה שכר גבוה יותר.
- ד. מעבר לכך – התדמית של פועל שהוא "מרכיב בניינים מודולריים", כנראה תיחשב גבוהה יותר מן התדמית של "פועל בניין" כיום, הן בעיני העובד עצמו והן בעיני האוכלוסייה בכללותה.
- ה. כתוצאה מכך, וככל ששכר העבודה יהיה גבוה יותר והעבודה נקייה יותר, בטוחה יותר ומעניינת יותר – יהיה אפשר למשוך אליה צעירים ישראלים, אשר עד כה סרבו אפילו לשקול את האפשרות של עבודה בבניין.
- ו. ובנוסף – אם כבר נאלצים לייבא תשומות עבודה מחו"ל – מוטב (כפי שהסיקו בסינגפור) לייבא אותן כחלק "מובנה" ("Built-in") בתוך מוצרים מוגמרים (היחידות התלת ממדיות) שהשעות של עובדים מחו"ל כבר הושקעו בהם בחו"ל. זה וודאי עדיף מלייבא ארצה פועלי-דחק שיעבדו באתרי הבנייה על כל הבעיות הנלוות.

לגבי החסרונות והחסמים אין מחקרים כמותיים, ולכן ניתן להתייחס אך ורק לממצאים שהתקבלו מהמחקרים שעסקו בעמדות של אנשי מקצוע, כולל במחקר הנוכחי, ומדיווחים של אנשי מקצוע בסינגפור לגבי הניסיון המצטבר שם מאז שהועלה הדרישה של רשות הבנייה ליישם בנייה מודולרית בחלק ניכר של הפרויקטים הציבוריים.

להלן עיקרי הממצאים לגבי **חסרונות הטכנולוגיה**, כאשר הרשימה מבוססת על סקרי עמדות, ניסיון מעשי מדווח בספרות המקצועית, והתכתבות עם גורמים מחו"ל כפי שמדווח בסעיף 7.3:

- חוסר נכונות של יזמים לקחת סיכונים בתנאי אי וודאות לגבי תפיסת השוק את המוצר הסופי (מופיע במאמר אחד הדן בתגובת משק הבנייה של סינגפור להחלטת רשות הבנייה שם לחייב יישום טכנולוגיה זו בחלק ניכר של הפרויקטים בבנייה ציבורית, ועלה גם במחקר הנוכחי בישיבת סיעור מוחות כחיסרון והחסם העיקרי להחדרת הטכנולוגיה לישראל);
- הצורך בתיאום כל הגורמים (ובעיקר יזם, מתכננים, מפעל, וקבלן מבצע) מראשית הפרויקט, תוך לקיחה בחשבון של פרטי הטכנולוגיה כבר בשלב התכנון הראשוני;
- החשיבות הרבה של תכנון מלא ומפורט והשלמתו טרם תחילת ביצוע עבודות כלשהן עבור הפרויקט;
- אילוצי שינוע המשפיעים על מידות הרכיבים, עלות, והיבטים קונסטרוקטיביים של הרכיבים בעת השינוע;
- חוסר האפשרות לביצוע שינויים תוך כדי הביצוע באתר והגמישות המופחתת לביצוע שינויים בעתיד;
- העלות הראשונית הגבוהה הכרוכה בהקמת מפעלים, ושטחי הביצוע והאחסון הגדולים הדרושים במפעל, וזאת בעיקר בתנאי אי וודאות לגבי רציפות הפעילות של המפעל;
- סטיגמה ודעות קדומות הקיימות כנגד תיעוש בכלל, ותיעוש אינטנסיבי בפרט;
- עיצוב ואסתטיקה (כשאינן חזית חיצונית נוספת מותקנת באתר) שנובעים מהמודולריות, החזרתיות, וקיום התפרים בין היחידות;
- פערי ידע בקרב הציבור המקצועי (פרויקט Dean461 בברוקלין הוכיח את התוצאות ההרסניות לפרויקט שנובעות מתהליך מימוש פרויקט יומרני בן 32 קומות ע"י צוותי תכנון וביצוע מנוסים מאוד בבנייה רגילה, אך שאינם בקיאים בטכנולוגיה המודולרית).
- מבחינה כלכלית היא כדאית רק כאשר כוח העבודה הזמין לבנייה הקונבנציונלית הוא יקר יחסית, בין משום שקיים מחסור בכוח אדם לא מקצועי או מסיבות אחרות (למשל, במקומות שונים בארה"ב – הכורח לעבוד רק עם עובדים מאוגדים).

5.5 היבטי תכנון, ביצוע, וניהול פרויקטים ייחודיים לבנייה המודולרית

5.5.1 ניהול תהליך התכנון והביצוע בבנייה מודולרית

הספרות המקצועית מדגישה את ההבדלים המהותיים בין תהליך התכנון והביצוע בבנייה הקונבנציונלית לבין זה הנדרש בבנייה המודולרית:

התהליך בבנייה הקונבנציונלית הוא ליניארי – היזם בוחר אדריכל, האדריכל מכין את התכנון הרעיוני הראשוני, בשלבים המשכיים משלב מהנדסים ויועצים על מנת להכין תוכניות להכנת בקשה להיתר,

מכין מסמכי מכרז לבחירת מבצע, המבצע מתכנן את האמצעים ולוח הזמנים של הביצוע ורק אז יש למעשה אינדיקציה ברורה למשך הפרויקט, הביצוע מתחיל בעבודות עפר ועולה כלפי מעלה קומה אחרי קומה כשעבודות השלד מקדימות את יתר העבודות בקומה. סיום השלד נשאר עבודות רבות לביצוע (קירות פנים וחוף שאינם נושאים, מחיצות, התקנת צנרת וחיווט ואביזרים של כל מערכות השירות, בידוד תרמי ואקוסטי, עבודות איטום, עבודות צבע, וכד'), במהלך הפרויקט המתמשך תוכניות הביצוע הסופיות זורמות אל הקבלן עם התקדמות העבודה כאשר לעיתים מזומנות מיושמים שינויים לעומת מסמכי המכרז, כולל שינויים של "הרגע האחרון".

תהליך התכנון והביצוע של פרויקט בבנייה מודולרית שונה במהותו. ההחלטה ליישם טכנולוגיה זו צריכה להתקבל בראשית ייזום הפרויקט, ומרגע שהתקבלה יש לקבוע את שיטת הבנייה הספציפית, כלומר את המפעל הספציפי שייצר את היחידות התלת ממדיות. צוות התכנון צריך לכלול מלכתחילה את כל אנשי המקצוע, כולל אדריכל ומהנדס של המפעל על מנת להבטיח שהתכנון מתאים לאפשרויות הייצור ומובטחת בניות מתאימה (Constructability). מיד עם תחילת עבודות העפר מתחילים במפעל בייצור היחידות, ולכן התוכניות המופקות בתום התכנון כמעט ואינן ניתנות לשינוי (למעט התאמות ושינויים מזעריים בתכנון הפנימי בתוך יחידות בקומות גבוהות יותר שעדיין לא נרכשו החומרים עבורן ולא החלו בייצורן. תהליך הביצוע אינו טורי כלל משום שהגרעין המרכזי מתקדם ויחד איתו, בהפרש לא גדול מתקדמת ההרכבה בקומה, אשר כוללת למעשה התקנה בו זמנית של השלד עם כל יתר החלקים שהגיעו עם היחידה (מחיצות, מערכות, בידוד, איטום, גמר, צבע, וכד'). המלאכות היחידות שנעשות באתר (בתחומן של היחידות המודולריות) הן חיבורים בין היחידות לבין עצמן, חיבורן לגרעין, והוספות של מחסומי אש וחומרי איטום במרווחים. רק בגג נחוצה פעילות כוללת של בידוד ואיטום הגג. כאשר היחידות אינן כוללות את הגימור הסופי של החזיתות (בדרך כלל מטעמים של תכנון אדריכלי שמנסה להעלים את הטכנולוגיה החבויה מתחת למראה החזיתות) מבצעות באתר גם עבודות נוספות כגון איטום החזית, והוספת שכבת בידוד לצד ההתקנה של החזיתות הדקורטיביות.

ההבדלים המהותיים האלה מחייבים שינוי תפיסתי, שמוצג בחלק ניכר של הספרות מצד אחד כחסם להחדרת הטכנולוגיה של הבנייה המודולרית, ומצד שני כשינוי שבלעדיו הסיכוי להצלחת הטכנולוגיה בקנה מידה גדול של ענף הבנייה מוטל בספק.

5.5.2 תכנון אדריכלי

היבטים של תכנון אדריכלי בבנייה מודולרית מופיעים בעיקר בספרים ובמדריכים, בדוחות ייעודיים, וכן במספר מאמרים. במסגרת ההדגמה של טופולוגיות בנייה שונות מבחינת צורת הבניין הסופית ומראהו, מודגם גם היישום של קומות בסיס קונבנציונלית הנחוצות בהתאם לפונקציות נוספות בבניין, וכן היישום של גרעין מרכזי מבנייה קונבנציונלית הנחוץ מטעמים קונסטרוקטיביים בבנייה שגובהה עולה על כ- 6 קומות.

מספר מקורות עוסקים בקשר בין התכנון המודולרי הכללי לבין תוכניות אדריכליות אפשריות של קומות טיפוסיות בבניינים מסוגים שונים ולתוכניות של הדירות בקומה, כאשר המדריכים מתמקדים בעיקר בקשר בין דרישות התקנות מבחינת מידות בבניין לבין התוכניות המתאפשרות.

לאחרונה מתגבר העיסוק בתכנון בעזרת BIM, כאשר התפיסה העיקרית היא שבעזרת BIM וממשק למכונות CNC (תכנון וביצוע בעזרת מחשב) אפשר יהיה לקדם את הבנייה המודולרית לדרגת התיעוש הגבוהה ביותר האפשרית בתקופה זו בתחום הבנייה.

5.5.3 תכנון הנדסי, תפקודי ומערכות הבניין

הספרות המוקדמת שעסקה בהיבטים ההנדסיים של הבנייה המודולרית טפלה בעיקר בנושאים כלליים ועקרוניים הקשורים ליציבות הכללית, לסכמות הסטטיות הכוללניות המתאימות להעברת הכוחות האנכיים והאופקיים, לעמידות ברעידות אדמה, למיזון של סוגי הבנייה השונים לפי גובה הבניינים (הקשר בין גובה הבניין לאפיון היחידות, ולאפיון המבנה הכולל – עם גרעין מרכזי ובלעדיו), ולמחברים על סוגיהם השונים. דוחות ומדריכים, שהוכנו בדרך כלל בהזמנת גופים ציבוריים וממשלתיים המעוניינים לעודד ולקדם את הבנייה המודולרית, כוללים גם הדגמות של פרטי מבנה אופייניים.

ההתמקדות במחקרים המתבצעים בשנים האחרונות בתחום הנדסת מבנים היא בנושאים פרטניים כגון: פיתוח, אנאליזה מבנית וניסויי מעבדה של מחברים חדישים המאפשרים הרכבה וחיבור נוח באתר; השפעה של התנהגות מחברים מסוגים שונים על אורך הקריסה של עמודים, על היציבות במקרה של כשל מקומי ברכיב בודד, או על כשל בשרשרת; תרומת אלכסונים ושיטות הקשחה אחרות על הפחתת הסיכון לכשל בשרשרת; ופיתוח שיטות אנאליטיות למידול מתאים לצורך בחינת ההתנהגות ברעידות אדמה.

מחקר שעסק בקיים של רכיבים מבניים דקי דופן הגיע למסקנות בדבר התאמת עובי הגלבון לתנאי חשיפה שונים: על סמך מחקרים מספר המחקר הסיק שאורך החיים התכנוני של גלבון באבץ חם בשיעור 275 גרם למ"ר (20 מיקרומטר) מאפשר אורך חיים תכנוני של כ-230 שנה בתנאים יבשים של אלמנטי בניין, 100 שנה בגג מבודד כהלכה, 60 שנה בגג שאינו מבודד, כ-60 עד 180 שנה בחיפויי קיר כתלות ברמת הלחות המתמדת לה נחשפים הרכיבים, וכ-50 עד 100 שנה ברצפה תחתונה כתלות ברמת הלחות השוררת בה.

היבטים של קיימות חוזרים ומופיעים במספר מחקרים, וכולם מראים כי כמות פסולת הבנייה מופחתת בצורה ניכרת, ולעומת הבנייה הקונבנציונלית בה הפסולת מהווה כ-10% עד 15% מהחומר המגיע לאתר, בבנייה המודולרית ישנה הפחתה כוללת של הפסולת בכ-60% עד 95%. אף על פי שיש הצהרות מילוליות במספר גדול של עבודות שבנייה מודולרית נחשבת כ- "בנייה ירוקה", אין לכך תימוכין במספיק עבודת מחקר שיטתיות (למעט נושא הפחתת הפסולת שנחקר היטב, כאמור לעיל). בעיקר לא נבדקה ההשפעה המלאה במחזור החיים של שיטות בנייה שונות בבנייה מודולרית לעומת שיטות

בנייה קונבנציונליות וטרומיות מסוגים אחרים תוך שימוש בשיטות של LCA (Life Cycle Assessment) לבחינת הנושא בבנייה לגובה.

בנושאים הקשורים לתפקוד האקוסטי של הבנייה המודולרית יש מעט מאוד חומר בספרות, אך המחברים טוענים בדרך כלל שבזכות ההכפלה של אלמנטים (קירות, תקרה-רצפה) כושר הבידוד בפני קול נישא באוויר משופר לעומת הבנייה הקונבנציונלית. לגבי מעבר קול הולם וההשפעה של סוגי מחברים שונים לא מצאנו מחקרים מעבדתיים שניתן להסיק מהם מסקנות כלליות. כמו כן לא מצאנו מחקרים העוסקים בחריקות עקב תזוזות מבניות.

הספרות העוסקת במערכות השירות בבניינים הבנויים בטכנולוגיה של בנייה מודולרית מתמקדת בעיקר בתיאור המערכות, אופן פרישתן בתוך היחידות כך שניתן יהיה לרכז שטחי שירות, ואופן חיבורן בין היחידות לבין המערכת המשותפת. בסינגפור מושקע מאמץ מחקרי והנדסי משולב להוביל נושא זה צעד נוסף ולבחון אפשרויות לתיעוש מתקדם של חלקי המערכות גם בחלקים של המערכת המשותפת, העוברת בדרך כלל מחוץ לתחום היחידות המודולריות.

כמו כן קיים בתקופה האחרונה ניסיון לקשר בין הגורמים והאילוצים ההנדסיים והתפקודיים השונים (יציבות המבנה, תפקוד תרמי-אנרגטי, איכות החומרים) ולבצע אופטימיזציה רבת משתנים ומרובת מטרות (יציבות מרבית, אנרגיה מינימלית, מינימום חומר, וכד').

5.6 היבטים כלכליים בבנייה מודולרית

מספר ממצאים שמשפיעים על ההיבט הכלכלי חוזרים על עצמם במאמרים השונים, כגון: הבנייה המודולרית, המתבססת על יחידות מוגמרות מיוצרות במפעלים ודורשת באתר רק פעולות הרכבה וחיבור, מתגברת על המחסור בכוח אדם המתאים לעבודת הכפיים הקשה באתרי בנייה קונבנציונליים; בנייה זו מקצרת את משך הביצוע הכולל של הפרויקט, ולכן בבנייה להשכרה היא מאפשרת הקדמה של השכרת הנכס והתחלת קבלה של דמי השכירות לעומת הבנייה הקונבנציונלית; היא מצמצמת את כמויות פסולת הבנייה; אינה זקוקה לפיגומים באתר כאשר גמר החזיתות מגיע עם היחידות התלת ממדיות; מקטינה את עלויות ההכנה באתר; וכן מקטינה בדיעבד עלויות תיקונים בתקופות הבדק והאחריות בזכות התכנון המפורט והביצוע הקפדני האופייניים לעבודה במפעל שהיא אחידה, תעשייתית ומבוקרת היטב ולכן ברמה גבוהה יותר מאשר בבנייה הקונבנציונלית.

אף-על-פי שחלק מעלויות החומרים והייצור בבנייה מודולרית גבוהות יותר מהעלויות בבנייה קונבנציונלית, לעתים רבות החיסכון בעלויות האחרות משתלם לטווח הרחוק גם ברמת היזם וגם ברמת המשק.

על אף יתרונותיה, נראה שהחסמים העיקריים לבנייה מודולרית בעולם בכלל, ובישראל בפרט, הם תפיסת הסיכון של היזמים שלא יודעים להעריך היטב את התועלות אל מול החיסכון, וכן החשש משמרנות השוק שלא יסכים לרכוש דירות שנבנו בבנייה מודולרית בשל דעות קדומות. אל אלה נוסף

חסם כלכלי נוסף הנובע מהצורך בהשקעה ראשונית גבוהה, שיכולה להיות משני סוגים: (1) השקעה גבוהה בהקמת מפעל מקומי, (2) הוצאה כספית מהירה של היזם על הזמנת היחידות מהמפעל (שנמצא בארץ בה נבנה הפרויקט או בחו"ל), ואז, במקרה של בנייה לדירות הנמכרות בשוק החופשי, היווצרות לחץ למכור את כל הדירות בפרק זמן קצר מזה הניתן בבנייה הקונבנציונלית. חסם כלכלי נוסף עלול להיווצר מהעובדה שמימון הבנקים צריך להתאים לקצב תזרים המזומנים, שהוא שונה מזה שבבנייה קונבנציונלית (והבנקים צריכים לספק את המימון בקצב המהיר, המיוחד לבנייה המודולרית).

הצורך להתגבר על החסמים הנ"ל גם במדינות אחרות, לצד הצורך להחזיר למשק הבנייה טכנולוגיות מתועשות שיפתרו בעיקר את שתי הבעיות העיקריות של הענף: מחסור בכוח אדם, ומשך הביצוע הארוך של פרויקטים, גרם לכך שבחלק מהן הוחלט לנקוט בפעילות פרואקטיבית לקידום הבנייה המודולרית. באירופה, בארה"ב ובאוסטרליה הפעילות מתבטאת בעיקר בפעולות עידוד הכוללות: השקעת משאבים לביצוע מחקרים כוללניים בתחום והכנת דוחות שיכולים לעמוד לרשות הציבור המקצועי ורשויות הבנייה; הצגת מידע על בנייה זו לציבור הרחב באמצעות תיאור מקרי בוחן מוצלחים; הכנה של מסמכים מקצועיים תומכים שיכולים לסייע למתכננים בגישור על פערי ידע; הכנה של מסמכים הדרושים להשלמת התקינה ובחינת שיטות הבנייה הספציפיות של מפעלים שונים; וארגון של כנסים מקצועיים בינלאומיים. בסינגפור רשות הבנייה נקטה, לצד כל הפעילויות המוזכרות לעיל, גם בפעילות פרואקטיבית של אכיפת שימוש חלקי או מלא בטכנולוגיות מסוג זה בפרויקטים של הבנייה הציבורית כבר משנת 2014. החל משנת 2019 היא מחייבת לבצע את כל חדרי הרחצה והשירותים מ- PBU – Prefabricated Bathroom Units, כלומר יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל הכוללות את כל הצנרת, הכלים הסניטריים והגימור הפנימי. כמו כן היא דורשת שהבנייה הציבורית תבוצע ככל האפשר בטכנולוגיה זו כך שדרגת היישום תגיע לכ- 35% של הפרויקטים. לצורך היישום הוכנה תשתית מאוד מסודרת של מנגנוני הסדרה, הכוללת את כל הגופים והנהלים הדרושים ליישום, מדריך כתוב לאנשי המקצוע, ומערכת מידע אינטרנטית לגבי שיטות הבנייה והמפעלים הקיימים כולל שלב הבדיקה והאישור של כל שיטה. על אף האכיפה הפעילה, מספר המפעלים המקומיים אינו מספיק וחלק ניכר של הבנייה המודולרית בסינגפור מבוסס בינתיים על יבוא של היחידות ממדינות אחרות כגון סין ואוסטרליה.

פרק 6: תמונת מצב קיים בישראל

הבנייה הרוויה למגורים בישראל מבוססת ברובה על שלד מבטון מזוין הכולל קירות חוץ מבטון עם חיפוי אבן. הבנייה של קירות החוץ מבוצעת באתר, במקומן הסופי בבניין, באמצעות טפסות פלדה מתועשות עליהן מתקינים את חיפוי האבן ורשת הזיון של הקיר, כולל עוגנים מתכתיים המחברים אל הרשת, ויציקה של הבטון אל תוך הטפסות. קירות הפנים הלא נושאים (בעיקר בגרעין ובהפרדה בין הדירות) מבוצעים מבטון יצוק באתר. קירות הפנים הלא נושאים (מחיצות) מבוצעים לרוב מבלוקי גבס או מחיצות מלוחות גבס על זקיפי פח פלדה מעוצב בקר, ולעיתים מבלוקי בטון תאי מאושפר באוטוקלאב, או מבלוקי בטון חלולים. הבידוד התרמי של המעטפת מבוצע לרוב בצידם הפנימי של קירות החוץ, באמצעות אחת או יותר מהשיטות הבאות: מזרוני צמר מינרלי בין זקיפי פח פלדה וחיפוי מלוחות גבס; בלוקי בטון תאי מאושפר באוטוקלאב; טיח תרמי פנימי; לוחות צמנטיים קלים עם תכולה גבוהה של גרגרי פוליסטירן. שלוש הטכנולוגיות האחרונות מחייבות יישום של טיח פנים רגיל. לצד טכנולוגיה רווחת זו, מבוצע חלק קטן של הבנייה הרוויה למגורים עם קירות נושאים טרומים מבטון, ובכלל זה קירות חוץ טרומים שמיוצרים במפעל כשהם כוללים כבר את חיפוי האבן, ומובאים לאתר הבנייה לצורך הרכבה, השלמת הבידוד התרמי הפנימי, וגימור פנימי (בשיטות כנ"ל). בפרויקטים בודדים (למשל עיר הבה"דים) הקירות הטרומים הם מסוג "כריך" וכוללים גם את הבידוד התרמי בנוסף לחיפוי האבן, כך שלאחר הרכבתם באתר אין למעשה עבודות נוספות באתר פרט לצביעת פניהם הפנימיים של הקירות. בחלק מהמקרים בנייה עם קירות טרומים כוללת גם יישום של תקרות קרום מבטון, הכוללות את הזיון התחתון של התקרות ומהוות תבנית ליציקת השלמת היציקה (טופינג) של התקרות. השימוש בלוחות חלולים דרוכים (לוח"דים) אינו נפוץ בבנייה למגורים, בעוד שבבניינים מסוגים אחרים (משרדים, בתי מלון, תעשייה) הוא מהווה נתח גדול מבניית התקרות. במרבית הפרויקטים ביצוע מערכת הריצוף אינו מתועש ומבוסס על עבודת כפיים הכוללת יישום של מצע גרנולרי והנחת אריחים על גבי מלט מהודק. שיטות אחרות של ריצוף ננקטות בארץ רק במקרים מיוחדים, בדרך כלל לפי הזמנת רוכשי הדירות: למשל - פרקט על גבי רצפת בטון מפולסת או על גבי מדה מתפלסת, או בקומת קרקע הדבקה ישירה של אריחים ללא מצע.

בזמן עריכת מחקר זה רק כ- 5 מהמפעלים לבטון טרום הקיימים בישראל מייצרים גם קירות חוץ ותקרות קרום שנועדו לבנייה מגורים (אקרשטיין, אשקריט, טרום תבור, סיבוס רימון, רמט טרום). יתר המפעלים מייצרים רק לוח"דים, עמודים, קורות, מסגרות, מקטעי גשרים, ומוצרי בטון טרום למבנים שאינם למגורים.

חלק מהמפעלים הטרומים מייצרים גם יחידות טרומות תלת ממדיות מבטון שנועדו לבנייה נמוכה עד שתי קומות לכל היותר, בדרך כלל של משרדי שדה ארעיים, גני ילדים, ובתי ספר. יחידות אלה כוללות רצפה, קירות ותקרה, פתחים עבור חלונות ודלתות, ולעיתים גם את כל חומרי הגמר כולל מערכות החלון ודלת החוץ. משקל של יחידה כזו מגיע לכדי 70 טון. מפעל אשקריט מייצר בשיטה זו גם תאים

מוגמרים עבור בתי סוהר. מרבית המפעלים המוזכרים לעיל מייצרים גם יחידות תלת ממדיות הקרויות "אוהלים", אשר כוללות רצפה תקרה וחלק מקירות החוץ, ונועדו להחליף את אוהלי הבד שבשימוש צבאי.

לצידם של המפעלים לבטון טרום קיימים בישראל מספר קטן של מפעלים המייצרים ומרכיבים יחידות תלת ממדיות בבנייה קלה עם שלד פלדה. הניסיון המצטבר של חברות אלה הוא בבנייה נמוכה עד שתי קומות שנועדה בעיקר לגני ילדים, בתי ספר, משרדים ומעט מאוד למגורים. במסגרת המחקר הצלחנו לקבל נתונים ממפעל "ישראלמרין" שהוא בעל היקף פעילות גדול יחסית, בעוד שהמפעל הגדול הנוסף ("רולן"), וכן שני המפעלים בעלי היקף הפעילות הקטן יותר ("היחידה – בנייה מתועשת", ו"המתועשת"), לא נאותו לספק נתונים במסגרת המחקר. היחידות המיוצרות בישראלמרין הן ברוחב של 3.75 עד 4.5 מ', אורך של 12 עד 14.5 מ', ומשקל של 10 עד 13 טון. העמודים והקורות של שלד היחידה הם מפרופילים מעורגלים בחם, כאשר ברצפה משולבת בדרך כלל יציקה של בטון מזוין, ויתר האלמנטים (קירות ותקרה) ממערכות עם זקיפי פח פלדה מעוצב בקר וסגירה עם לוחות (גבס או צמנט, בהתאם למיקום). כל האלמנטים, כולל קירות יחידה שיהוו בבניין המוגמר קירות פנים, כוללים שכבת בידוד תרמי מצמר מינרלי או פוליסטירן מוקצף, בהתאם למיקום ולהתאמה הטכנולוגית. לצורך ביצוע מדויק ותיאום מלא של החיבורים, הריצוף והדלתות הפנימיות, היחידות של כל הקומה מוצבות על רצפת המפעל בהתאם לתוכנית הקומה. פילוס הרצפות, פרטי החיבור, הריצוף ועבודות הגמר מבוצעים במצב זה תוך הקפדה על אחידות המפלסים, הסבולות (טולרנסים) הדרושות, וכל פרטי המפגש בין היחידות. לאחר מכן המערכת מפורקת מחדש ליחידות הנפרדות, ורכיבי ההשלמות במפגשים שבין היחידות מגיעים לאתר באחת היחידות כשהם מתאימים כבר להרכבה סופית, שתבוצע לאחר הרכבת היחידות באתר. בבניין שכולל יותר מקומה אחת יוצקים באתר גרעין מבטון, אשר כולל גם את הממ"ק, ואליו מתחברות היחידות באמצעות תפרי התפשטות. בכל התפרים, הקיימים במפגשים בין היחידות, ממלאים באתר בידוד תרמי כדי למנוע גשרים תרמיים עקב המרווחים שבין היחידות. תזמון העבודה במפעל הוא לפי ההתקדמות באתר, ולא מייצרים יחידות מראש לתקופת אחסון ממושכת. בדרך כלל ניתן להעמיד במקומן עד כשמונה יחידות תלת ממדיות ביום עבודה. בהיעדר ניסיון ביישום הטכנולוגיה בבנייה גבוהה, הערכה זהירה של החברה היא שבבניין עם 4 דירות לקומה אפשר להגיע לקצב הרכבה ממוצע של קומה בחודש עד חודש וחצי, כולל כל עבודות הגמר, תיאום והשלמת המערכות, והאיטום. בהתאם לכך, בניין גבוה בן כ- 10 קומות (כלומר, בניין בו היחידות מחוברות ביניהן ולגרעין, ללא צורך במערכת מבנית נוספת להעברת כוחות אופקיים) ניתן להקים ולסיים תוך 12-18 חודשים מסיום עבודות העפר וביצוע המסד. צבירת ניסיון ביישום הטכנולוגי בבנייה גבוהה תוביל כנראה לקיצור משך הביצוע, אך אין אפשרות לוודא זאת בשלב הנוכחי.

פרק 7: יתרונות, חסרונות, חסמים, ועמדות מקצועיות

סקר הספרות הראה שבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל היא אכן בעלת יתרונות רבים, שהעיקריים בהם הם: קיצור ניכר של משך הביצוע באתר ושל משך הפרויקט כולו; שיפור איכות הבנייה; הגברת הפריון; הגברת הבטיחות בעבודה ובעיקר באתר הבנייה; הקטנה ניכרת של השפעת הבנייה על הסביבה, בעיקר מבחינת צמצום פסולות והפרעה של רעש וזיהום אוויר בסביבת אתר הבנייה; ושיפור מהותי בתנאי העבודה של העוסקים במלאכה. לצד היתרונות, הסתבר שגם בחו"ל בנייה מסוג זה נתקלת במספר חסמים שכוללים בעיקר: הצורך בתיאום כל הגורמים (ובעיקר יזם, מתכננים, מפעל, וקבלן מבצע) מראשית הפרויקט; החשיבות הרבה של תכנון מושלם והשלמתו טרם תחילת ביצוע עבודות כלשהן עבור הפרויקט; אילוצי שינוע המשפיעים על מידות הרכיבים, עלות, והיבטים קונסטרוקטיביים של הרכיבים בעת השינוע; חוסר האפשרות לביצוע שינויים תוך כדי הביצוע באתר והגמישות המופחתת לביצוע שינויים בעתיד; העלות הראשונית הגבוהה הכרוכה בהקמת מפעלים ושטחי הביצוע והאחסון הגדולים הדרושים במפעל; ודעות קדומות הקיימות כנגד תיעוש בכלל, ותיעוש אינטנסיבי בפרט.

בשל היתרונות המוכחים ועל אף החסמים הללו, החליטה ממשלת סינגפור לנקוט בגישה פרואקטיבית מפורשת להחדרת בנייה מסוג זה לענף החל משנת 2014, ולחייב את הבנייה הציבורית ביישומה בחלק ניכר של הפרויקטים החל משנת 2019.

לצורך בחינת הישימות של החדרת טכנולוגיות מסוג זה לבנייה בישראל, נבחנו במסגרת המחקר העמדות של הציבור המקצועי המקומי ובמסגרות נוספות בחו"ל. בחינה זו נעשתה במספר דרכים:

- שאלון מובנה שהופץ באינטרנט בעזרת איגוד המהנדסים, עמותת האדריכלים והתאחדות בוני הארץ. מבנה השאלון וממצאיו מפורטים בתת-פרק 7.1.
- מפגש סיעור מוחות שכלל נציגים של מפעלים לבנייה מודולרית ובנייה טרומית, נציגי חברות בנייה קבלניות ויזמות, ומנהלי פרויקטים. תיאור מפגש זה וממצאיו מפורטים בתת-פרק 7.2.
- דיון והתכתבות עם גורמים המעורים במשק הבנייה ועוסקים בבחינה ובאישור של שיטות בנייה חדשות במספר מדינות בחו"ל כולל אוסטרליה, אירלנד, גרמניה, סינגפור, וצרפת. ממצאי הדיון וההתכתבות מפורטים בתת-פרק 7.3.
- סיור במפעלים בפולין ודיון עם גורמים בכירים במפעלים על פי רשימת שאלות מוכנה מראש.

7.1 שאלון מקצועי אינטרנטי

הוכן שאלון שהופץ באינטרנט לאדריכלים ומהנדסים באמצעות הגופים המקצועיים הפעילים בישראל. בשאלון נכללו שאלות לאפיון מקצועי של המשיב, ולאחריהן מספר קבוצות של שאלות העוסקות בהחדרת טכנולוגיה של בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל למשק הבנייה הישראלי. השאלות רוכזו תחת הכותרות הבאות: יתרונות פוטנציאליים, חסמים פוטנציאליים, התאמה

לסוג מבנים, קידום הטכנולוגיה, והובלת תהליך היישום. לשאלון השיבו כ- 50 אנשי מקצוע. להלן תיאור השאלון והממצאים:

7.1.1 מבנה השאלון ותכניו

השאלות הפרטניות בכל קבוצה ואפשרויות התשובה גובשו על סמך סקר הספרות והממצאים שהופקו ממנו. כל התשובות נרשמו בסדר אקראי על מנת למנוע הטעייה של המשיבים. להלן פירוט השאלות והתשובות האפשריות:

יתרונות פוטנציאליים:

בקבוצה זו היו שתי שאלות עיקריות, כאשר לכל שאלה צוינה רשימה ארוכה של תשובות אפשריות שלכל אחת מהן צריך היה לסמן רמת תמיכה מ- 1 (מאוד נכון) עד 5 (לא נכון). שתי השאלות היו:

(1) מהם לדעתך היתרונות העיקריים של שיטת בנייה העושה שימוש ביחידות תלת ממדיות בהשוואה לבנייה קונבנציונלית?

(2) מהם לדעתך היתרונות העיקריים של שיטת בנייה העושה שימוש ביחידות תלת ממדיות בהשוואה לבנייה מתועשת של יחידות דו ממדיות (קירות)?

התשובות האפשריות לכל אחת מהן היו:

- חיסכון בזמן - בנייה מהירה יותר
- חיסכון בכוח אדם
- חיסכון בחומרי בנייה
- פחות טעויות בנייה
- בנייה בטיחותית יותר
- הקטנת כמות פסולת בנייה
- שליטה טובה על איכות הבנייה/בנייה איכותית יותר
- שליטה טובה יותר על התקציב
- בנייה חלקית במפעל - שליטה טובה יותר בתהליך הבנייה
- פגיעות נמוכה יותר לבעיות מזג אוויר בזמן הבנייה
- פגיעה מופחתת בסביבת האתר מבחינת רעש, אבק וכד'
- הגדלת הפריור של כוח האדם
- הטבת תנאי העבודה של כוח האדם

חסמים פוטנציאליים:

בדומה לקבוצה הקודמת, גם בקבוצה זו היו שתי שאלות עיקריות, כאשר לכל שאלה צוינה רשימה ארוכה של תשובות אפשריות שלכל אחת מהן צריך היה לסמן את רמת התמיכה מ- 1 (חוסם מאוד) עד 5 (לא חוסם כלל). שתי השאלות היו:

(1) מהם לדעתך החסמים העיקריים של שיטת בנייה העושה שימוש ביחידות תלת ממדיות בהשוואה לבנייה קונבנציונלית?

(2) מהם לדעתך החסמים העיקריים של שיטת בנייה העושה שימוש ביחידות תלת ממדיות בהשוואה לבנייה מתועשת של יחידות דו ממדיות (קירות)?

התשובות האפשריות לכל אחת מהן היו:

- סטיגמה נגד בנייה טרומית של לקוחות
- סטיגמה נגד בנייה טרומית של אדריכלים ויועצים
- רגולציה, חוקים ותקנות
- בעיות עיצוביות אסתטיקה
- ידע של מתכננים
- שילוב מוקדם של יצרן בתהליך התכנון
- שינוע לאתר
- בעיות חוזיות (עם הקבלן, אדריכל, יועצים)
- בעיות במימון פרויקטים מסוג זה
- בעיות תקציביות - עלות, הערכת עלות, תזרים מזומנים
- מחייב תיאום מלא בין יזם, אדריכל, יצרן וקבלן מתחילת הפרויקט
- התכנון חייב להסתיים לפני תחילת ביצוע היחידות במפעל
- העדר גמישות לשינויים עתידיים
- היחידות מבוססות בדרך כלל על בנייה מפלדה

בשאלה השנייה נוספו שתי התשובות הבאות:

- סטיגמה היסטורית נגד בנייה טרומית של יזם
- מחייב תיאום מדויק של הובלה והרכבה

התאמה לסוג מבנים:

בקבוצה זו הייתה שאלה אחת, שלאחריה באה רשימה ארוכה של תשובות אפשריות שלכל אחת מהן צריך היה לסמן רמת תמיכה מ- 1 (מאוד נכון) עד 5 (לא נכון). השאלה הייתה:

לאיזה סוג מבנים מתאימה לדעתך שיטה זו ביותר?

והתשובות האפשריות לה היו:

- מבני מגורים
- מבני תעשייה
- מבני חינוך
- מבני ציבור שאינם מבני חינוך
- מבני צבא ומשטרה
- משרדים
- בתי מלון
- מעונות סטודנטים
- אכסניות נוער
- דיור מוגן ובתי אבות

קידום הטכנולוגיה:

בקבוצה זו הייתה שאלה אחת:

האם לדעתך נכון לקדם את תיעוש הבנייה בכיוון של בנייה טרומית ביחידות תלת ממדיות?

ועליה צריך היה לבחור רק תשובה אחת מבין 4 התשובות הבאות:

- מהר ככל האפשר
- בשנים הקרובות
- בעתיד הרחוק
- לא כדאי, לא מאמין בשיטה.

הובלת תהליך יישום שיטת הבנייה:

בקבוצה זו הייתה שאלה אחת, שלאחריה באה רשימה ארוכה של תשובות אפשריות שלכל אחת מהן

צריך היה לסמן רמת תמיכה מ- 1 (מאוד נכון) עד 5 (לא נכון). השאלה הייתה:

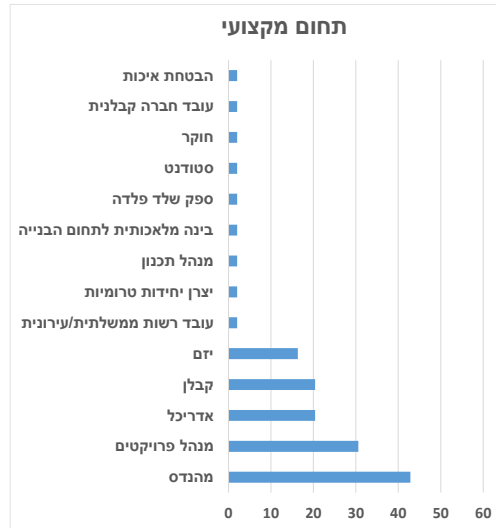
מי לדעתך צריך להוביל את קידום השיטה בארץ?

והתשובות האפשריות לה היו:

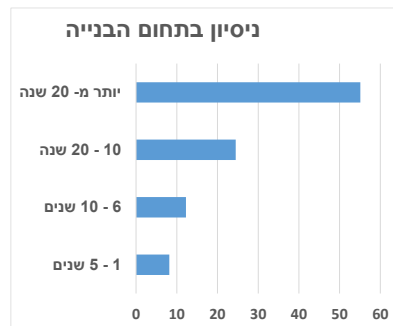
- משרד הבינוי והשיכון
- קבלנים – התאחדות בוני הארץ
- יזמים
- אקדמיה
- עיריות/מועצות מקומיות
- משרד הביטחון

7.1.2 ממצאי השאלון

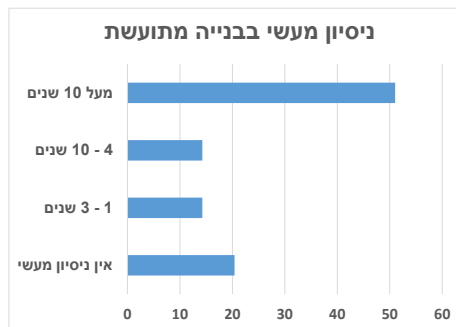
לשאלון השיבו 49 אנשי מקצוע (מתוכם 47 גברים ושתי נשים). פילוג נתוני המשיבים נתון בציורים 7.1.1 עד 7.1.4.



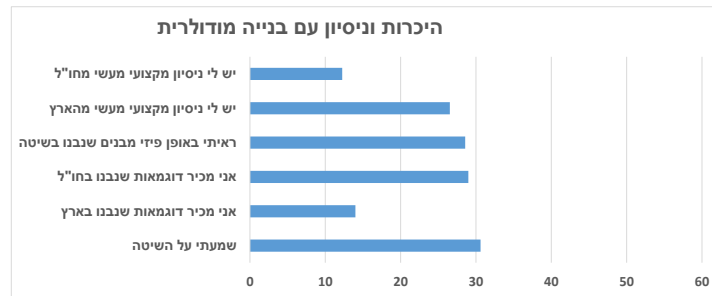
ציור 7.1.1: פילוג נתוני המשיבים: תחום מקצועי



ציור 7.1.2: פילוג נתוני המשיבים: ניסיון בתחום הבנייה



ציור 7.1.3: פילוג נתוני המשיבים: ניסיון מעשי בתחום של בנייה מתועשת



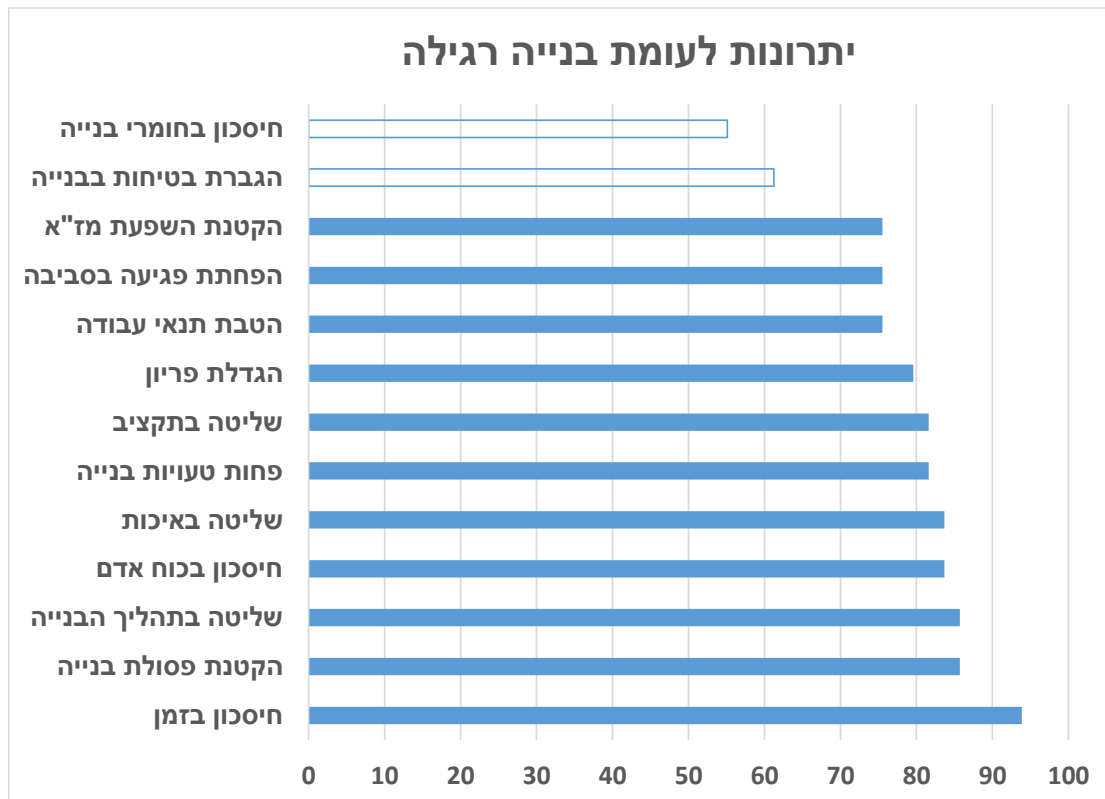
ציור 7.1.4: פילוג נתוני המשיבים: היכרות עם בנייה מתועשת ביחידות תלת ממדיות

מרבית המשיבים היו מהנדסים ומנהלי פרויקטים (כ- 43% ו- 31%, בהתאמה). חלק ניכר נוסף היו אדריכלים, קבלנים ויזמים (כ- 20%, 20%, ו- 16%, בהתאמה). היתר היו יצרנים (כ- 12%), ובעלי מקצועות אחרים בתחומי הבנייה (משיב אחד בכל מקצוע). למרבית המשיבים (יותר מ- 55%) ניסיון של יותר מ- 20 שנה בחום המקצועי, ורק לכ- 8% ניסיון קצר של פחות מ- 5 שנים, כאשר ליותר מ- 50% ניסיון מעשי של יותר מ- 10 שנים בתחום של בנייה מתועשת. יתר על כן, לכ- 38% של המשיבים ניסיון כלשהו עם טכנולוגיה של בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות.

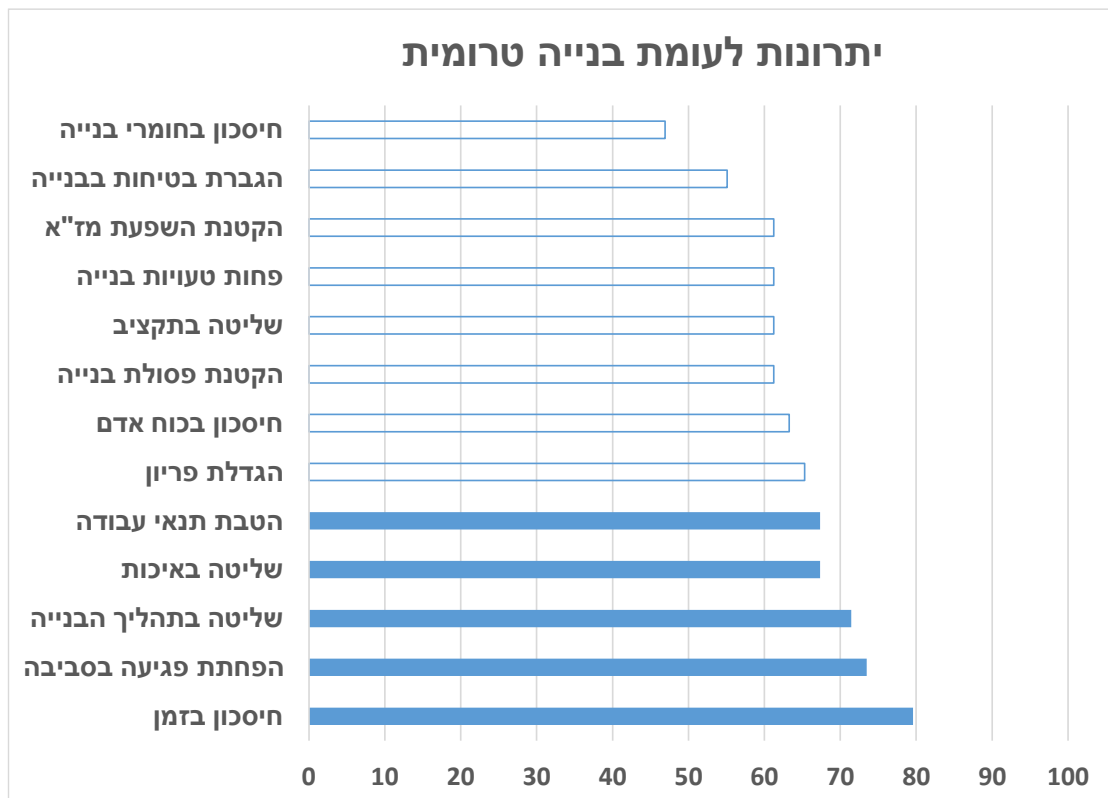
פילוג התשובות לשאלות השונות נתון בציורים 7.1.5 עד 7.1.11. כל מי שהשיב 1 או 2 נחשב כתומך בתשובה המוצגת. הסכמה עם יתרונות מודגשת בשרטוטים ע"י עמודות ממולאות בצבע רק כאשר יש יותר מ- 65% מסכימים עם היתרון. לעומת זאת הצגת נושא כחיסרון/חסם מודגשת כבר כאשר יש 50% או יותר שתמכו בתשובה המוצגת.

רמת ההסכמה לגבי היתרונות של הבנייה המודולרית לעומת הבנייה הקונבנציונלית הייתה גבוהה מאוד. היתרון הדומיננטי ביותר היה חיסכון בזמן עקב בנייה מהירה יותר (94%), וארבעת היתרונות הנוספים שזכו לתמיכה הגבוהה ביותר היו: הקטנת כמות פסולת הבנייה (86%), שליטה טובה יותר בתהליך הבנייה עקב בנייה חלקית במפעל (86%), חיסכון בכוח אדם (84%), ושליטה באיכות (84%). בסוף רשימת התמיכה היו רק שני נושאים שזכו לתמיכה פחותה מ- 65%: הגברת בטיחות בבנייה וחסכון בחומרי בנייה, אך גם בהם תמכו יותר מ- 55%.

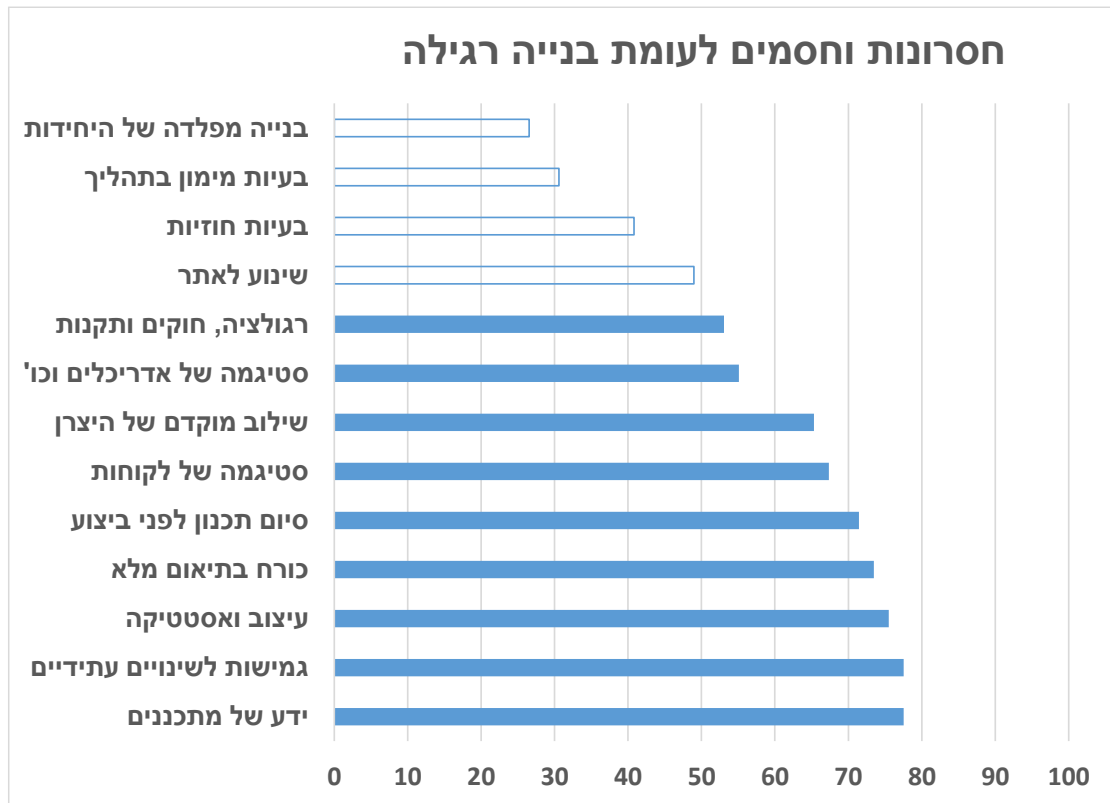
בהשוואה לבנייה הטרומית הרגילה הנהוגה בישראל (בנייה עם יחידות מישוריות דו-ממדיות של קירות ותקרות קרום), היתרון הדומיננטי היה שוב חיסכון בזמן עקב בנייה מהירה יותר (80%), וארבעת היתרונות הנוספים שזכו לרמת התמיכה הגבוהה ביותר היו: פגיעה מופחתת בסביבת האתר מבחינת רעש, אבק וכד' (73%), שליטה טובה יותר בתהליך הבנייה עקב בנייה חלקית במפעל (71%), שליטה טובה על איכות הבנייה/בנייה איכותית יותר (67%), והטבת תנאי העבודה של כוח האדם (67%). בסוף הרשימה היו 5 תשובות שזכו לתמיכה בשיעור נמוך מ- 65%, אך גם במקרה זה אחוזי התמיכה ליתר התשובות היו גבוהים יחסית, ופרט לחיסכון בחומרי בנייה (47%) כולם עמדו על יותר מ- 55%.



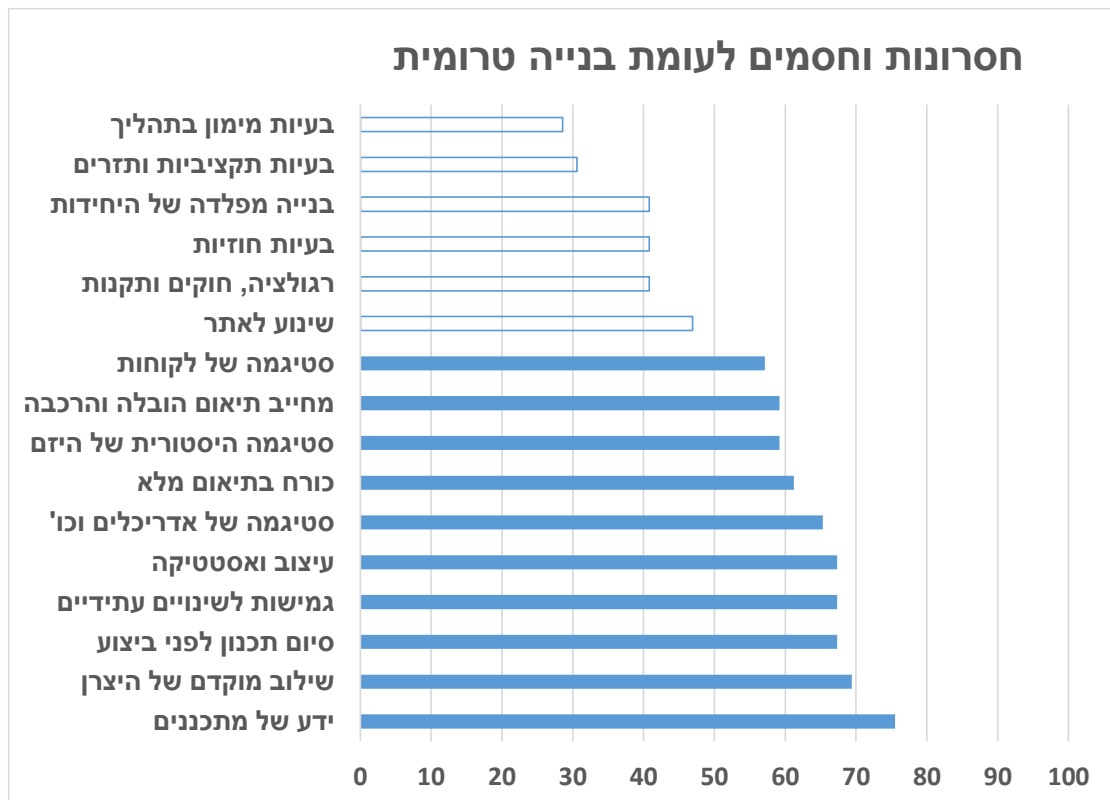
ציור 7.1.5: יתרונות הבנייה המודולרית לעומת הבנייה הקונבנציונלית



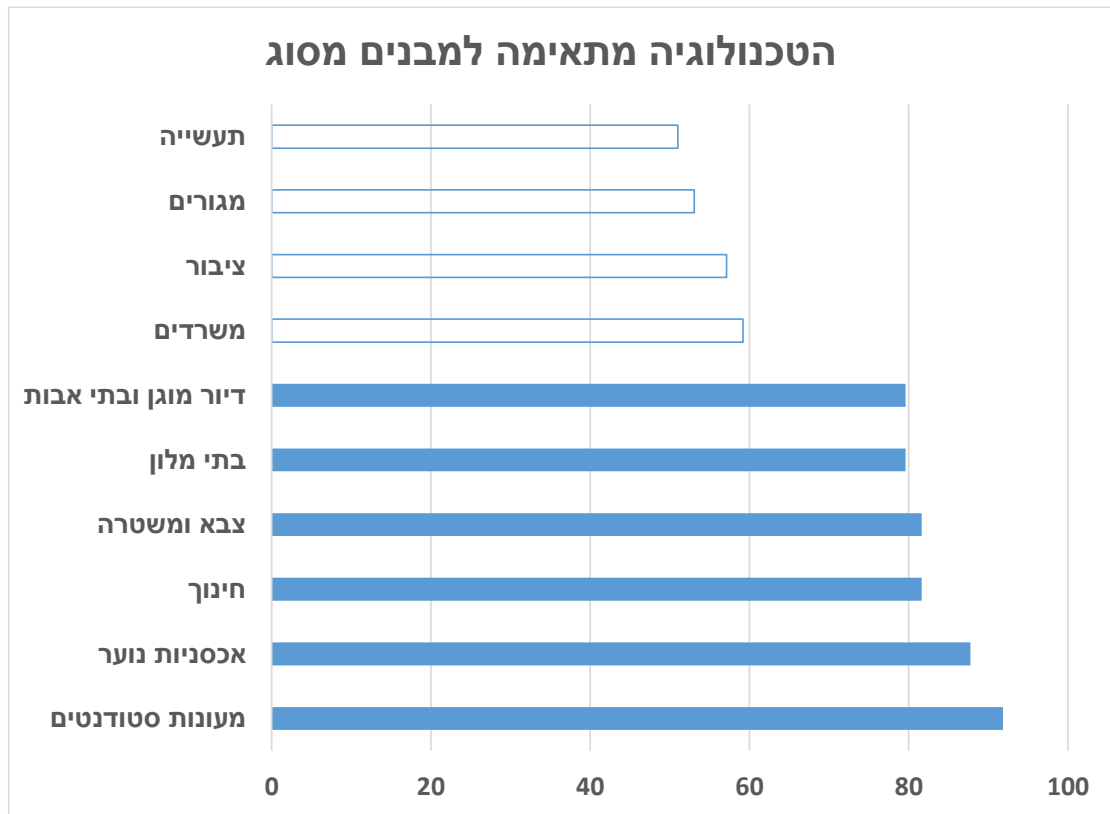
ציור 7.1.6: יתרונות הבנייה המודולרית לעומת הבנייה הטרומית הרגילה



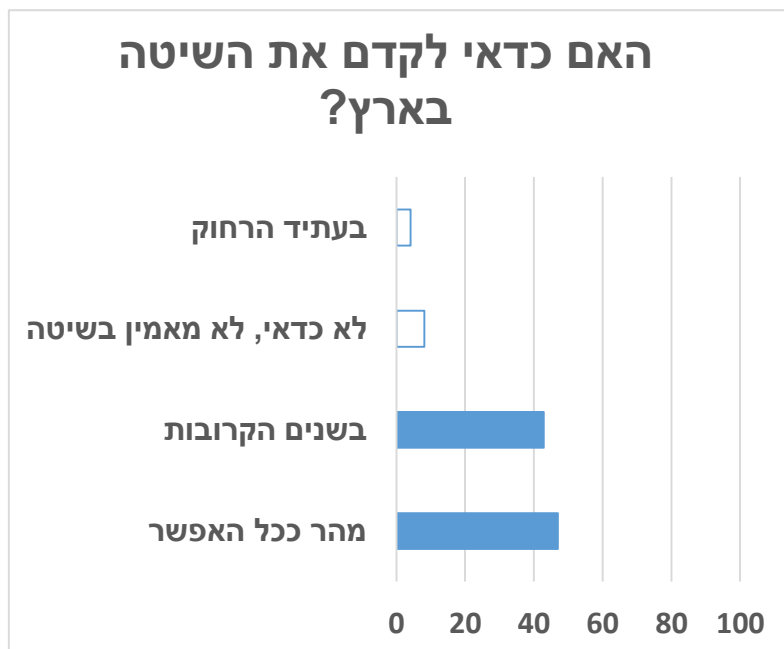
ציר 7.1.7: חסרונות וחסמים של הבנייה המודולרית בהשוואה לבנייה הקונבנציונלית



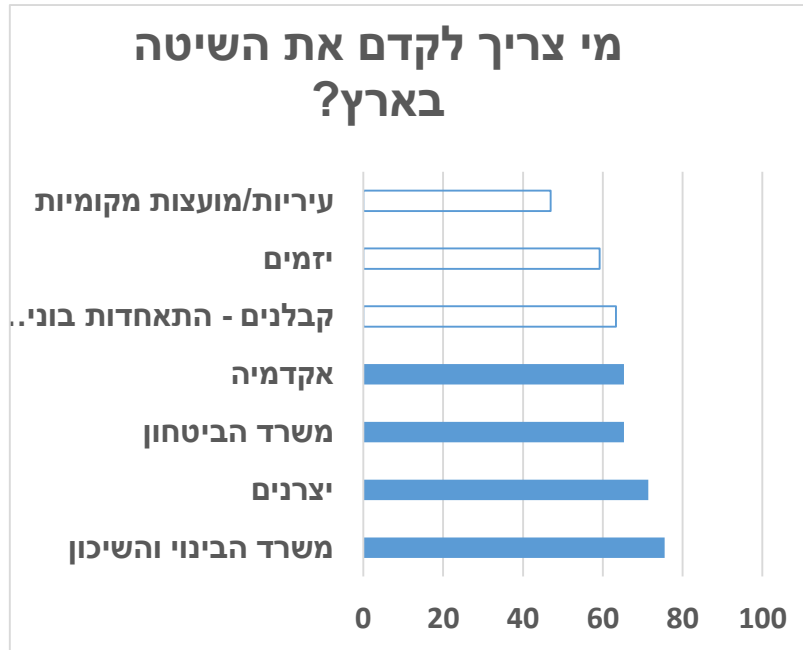
ציר 7.1.8: חסרונות וחסמים של הבנייה המודולרית בהשוואה לבנייה הטרומית הרגילה



ציור 7.1.9: מהם סוגי המבנים להם מתאימה הבנייה המודולרית?



ציור 7.1.10: האם נכון לקדם את הבנייה המודולרית בארץ?



ציור 7.1.11: מי צריך להוביל את קידום השיטה בארץ?

תוצאות אלה דומות חלקית למה שהתקבל בסקר הרחב שבוצע בארה"ב (Lu 2009), בו נבדקו היתרונות בצורה כללית ללא השוואה לטכנולוגיה אחרת ספציפית, וחמשת הגורמים שזכו לתמיכה הגבוהה ביותר היו: קיצור משך הביצוע של הפרויקט, הקטנת עלות הפרויקט, הגדלת איכות הבנייה, הגדלת הפריון, והגברת בטיחות הבנייה.

ברשימת התשובות לגבי חסמים לעומת הבנייה הקונבנציונלית, התמיכה הדומיננטית הייתה בשני חסמים: ידע של מתכננים (78%), והעדר גמישות לשינויים עתידיים (78%). שלוש החסמים שבאו מייד אחריהם היו: בעיות עיצוביות אסתטיות (76%), הכורח בתיאום מלא בין יזם, אדריכל, יצרן וקבלן מתחילת הפרויקט (73%); והתכנון חייב להסתיים לפני תחילת ביצוע היחידות במפעל (71%). בסוף הרשימה היו 4 תשובות שזכו לתמיכה נמוכה מ-50% (היחידות מבוססות על בנייה מפלדה; בעיות במימון פרויקטים מסוג זה; בעיות חוזיות עם הקבלן, אדריכל, יועצים; ושינוע לאתר).

בהשוואה לבנייה הטרומית הרגילה החסם הדומיננטי היה שוב ידע של מתכננים (76%), ואחריו באו 4 החסמים הבאים: שילוב מוקדם של יצרן בתהליך התכנון (69%), התכנון חייב להסתיים לפני תחילת ביצוע היחידות במפעל (67%), העדר גמישות לשינויים עתידיים (67%), ובעיות עיצוביות אסתטיות (67%). בסוף הרשימה הופיעו אותם חסמים כמו בשאלה הקודמת ונוספו עליהם עוד שני חסמים שזכו לפחות מ-50% תמיכה (רגולציה, חוקים ותקנות; ובעיות תקציביות - עלות, הערכת עלות, תזרים מזומנים).

בהשוואה לממצאים הנ"ל, בסקר הרחב מארה"ב התקבלו בראש הרשימה חמשת החסרונות/חסמים הבאים: הגבלת התכנון האדריכלי, הגדלת עלות הפרויקט, חוסר גמישות מספקת לשינויים באתר, אילוצי שינוע, ודעות קדומות של יזמים נגד בנייה טרומית.

סוגי הבניינים להם מתאימה השיטה לדעת המשיבים הם בעיקר (ברמה של 80% הסכמה או יותר): מעונות סטודנטים, ואכסניות נוער מבני חינוך, מבני צבא ומשטרה, בתי מלון, ודיור מוגן ובתי אבות. יתר סוגי הבניינים (משרדים, ציבור, מגורים ותעשייה) זכו לתמיכה נמוכה יותר (בין 50% ל- 60%).

לגבי הצורך בקידום הטכנולוגיה בישראל יש תמימות דעים בקרב מרבית המשיבים, כאשר 88% מהמשיבים סבורים שיש לקדמה מהר ככל האפשר או לפחות בשנים הקרובות. רק 8% מהמשיבים לא מאמינים בטכנולוגיה וסבורים שלא כדאי לקדמה.

לגבי מי הגורם שצריך לדאוג לקידום הטכנולוגיה בישראל מרבית התמיכה של המשיבים ניתנה למשרד הבינוי והשיכון (76%), ולצידו ליצרנים (71%), משרד הביטחון (65%), ולאקדמיה (65%). תמיכה לא מבוטלת ניתנה גם לקבלנים ויזמים (כ- 60%), בעוד שרשויות מקומיות לא נחשבות כגורם מוביל בנושא (47% בלבד).

7.2 מפגש סיעור מוחות ודיון עם יצרנים, קבלנים ומנהלי פרויקטים

מפגש סיעור המוחות נערך בתאריך 23.1.2019 על מנת ללבן נושאים הקשורים לאפשרות היישום של בנייה מודולרית מהסוג הנדון בבנייה למגורים בישראל, ובעיקר לדון במגבלות וחסמים ודרכי ההתמודדות עימם. השתתפו במפגש (בנוסף לחברי צוות המחקר, מזמיני המחקר במשרד הבינוי והשיכון, ומלווי המחקר) 23 נציגים של החברות הבאות: נציגי תעשיות: אלקטרה בנייה, אפקון, אקרשטיין, אשקריט, היחידה בנייה מתועשת, ישראלמירן, מייטק ישראל, מנרב פלדה, סקיליין עגורנים, פורטה-פרו לטביה, רמט-טרום; מנהלים ומהנדסים של חברות יזמיות וקבלניות: אשטרום, סולל בונה, עץ השקד הנדסה; ומהנדסים ומנהלי פרויקטים מהחברות: אחים מרגולין, התאחדות בוני הארץ, יונייב, מנהל התכנון, ומשרד הבינוי והשיכון.

הוצגו בפני המשתתפים היתרונות והחסרונות שנמצאו בסקר הספרות וכן היתרונות, והחסמים שנבעו מממצאי השאלון האינטרנטי. המשתתפים סברו שניתן להתגבר בקלות רבה על מרבית החסמים עליהם הצביעו המשיבים לשאלון, והדגישו שהחסמים העיקריים נובעים מהיבטים כלכליים ושיווקיים.

להלן עיקרי הדברים שנאמרו במפגש:

החסם הכלכלי

החסם העיקרי שהועלה על ידי המשתתפים אינו קשור להיבטים הטכנולוגיים או הלוגיסטיים של בנייה מהסוג הנדון, אלא לחוסר הנכונות של יזמים לקחת סיכונים בתנאי אי וודאות (ובבנייה למגורים תנאי אי וודאות שנובעים בעיקר משום שמדובר בטכנולוגיה שמגבילה את האפשרות להתאים את התכנון והגמר לדרישות רוכש הדירה). במקרה זה מדובר בשלושה סוגי יזמים:

1. יצרנים של תאים מודולריים,
2. קבלנים של עבודות הרכבה ו/או הנפה של יחידות המיוצרות בטכנולוגיה מסוג זה,

3. יזמים של פרויקטים לבניית בניינים מסוגים שונים.

לגבי חסם זה הועלה כפתרון תמריץ ממשלתי רציני שיסיר את אי הוודאות ויתיר את היזמים עם היתרונות הגלומים בטכנולוגיה. תמריצים שהוצעו הם: הבטחת רכישה ע"י המדינה במקרה של אי מסירה, הבטחת שוק לתקופה ארוכה, וגוף ממשלתי שיוביל ויהיה המנוע. דובר גם על דירות שיוזמנו על ידי המדינה, תגובת אנשי משרד הבינוי והשיכון הייתה ספקנית ביותר.

בנושא תמריצי משרד הבינוי והשיכון הועלתה הטענה שהכסף ניתן לקבלנים הראשיים שאינם משתפים בו את היצרנים. לכן הוצע שמשרד הבינוי והשיכון יציין במכרזים גם דרישה לתיעוש במפעל כתנאי לקבלת תמריץ.

נציג רמט-טרום ציין לטובה ומסר על ניסיון חיובי ביותר בנושא תיעוש הבנייה המוכתב על ידי משרד הביטחון, עוד ציין שיש להצטער על כך שנציגי משרד הביטחון אינם שותפים לדיון. נציגי חברת ישראלמרין דיווחו על פרויקט בביצוע של מבנה בן שש קומות עבור משרד הביטחון בשיטה המודולרית.

במסגרת החסם הכלכלי יש לציין גם את המחיר הנומינאלי של המודולים. המשתתפים סברו שבבנייה מהסוג הנדון לא תהיה הוזלה משמעותית במחיר הנומינאלי, ההיפך הוא הנכון, צפויה עליה של אחוזים ספורים בעלויות הישירות. מצד שני צפויה הוזלה עקב חיסכון בתקורות אתר ובהוצאות תזרים המזומנים, ובמקרה של בנייה להשכרה – הקדמה של תחילת קבלת דמי השכירות, אך אין לצפות לתועלות אלו כבר בפרויקט הראשון.

חסם שינויי דיירים

חסם זה נוגע רק לבניית בנייני מגורים רגילים (שנועדו לדירות למכירה), ומתייחס לעובדה שבמשק הבנייה הישראלי נהוג לאפשר לדייר לתכנן לפי ראות עיניו את מרכיבי הגמר הפנימיים. קיימת תמימות דעים כי הרגל זה פוגע באפשרות לשווק דירות מוגמרות מראש במפעל. המניעה היא כמעט מוחלטת מהסיבה הפשוטה שאין שום אפשרות להבטיח שבזמן ייצור היחידות עבור הדירות בקומה מסוימת כל הדירות הרלוונטיות תהיינה מכורות כבר והעדפות הדיירים תהיינה ידועות לפני תחילת הייצור.

מסיבה זו המשתתפים סברו שבנייה מסוג זה רלבנטית לפרויקטים של בנייה אחידה כגון מעונות סטודנטים, דיור מוגן, בתי אבות, דיור להשכרה, או פרויקטים של עמיגור. חלק מהנוכחים ציינו כאפשרות גם את פרויקטי "מחיר למשתכן" אך נענו כי אפילו בפרויקטים הזולים ביותר (כדוגמת כרמי גת) נדרשו שינויי דיירים.

כמו כן צוינה האפשרות ליישם את השיטה בפרויקטי מעטפת, אך חלופה זו מקטינה את התועלת הגלומה בשיטה המוצעת. כמו כן, פרויקטי מעטפת בבנייה למגורים נהוגים כיום בעיקר בפרויקטי יוקרה ואין זו האוכלוסייה שאליה מתייחס המחקר.

היערכות הלוגיסטית

בהקשר זה נשאלת השאלה מה המסה הקריטית שתצדיק הקמת מפעל? על פי נציג אשטרום 5,000 עד 10,000 יחידות דיור. נציג אשקריט ציין כמטרה 1000 יחידות דיור לחודש, דבר שיצריך לדבריו היערכות לוגיסטית נכבדת. מדובר במאות דונמים של שטח מפעל, עשרות פועלים בכל המקצועות, שטח של 300 עד 400 דונם, נגישות של נגרים, עובדים מקצועיים, מנהלים, מהנדסים ועוד. השקעה אדירה זו, שהוערכה על ידו בעשרות מיליוני שקלים, לא תבוצע לדבריו על ידי השוק הפרטי מבלי שתהיה הבטחה של אופק ביצוע.

בנוסף לכך נטען שאין כיום בארץ ציוד הנפה וניסיון הנפה בסדרי הגודל הנדרשים עבור בנייה מודולרית כבדה (עבור בנייה מודולרית מבטון הוגדר כ-30 טון ב-30 מטרים). נציג סקיליין מסר שהפתרון אינו פשוט, אך אפשרי.

חסם הרגולציה

משך הזמן בקבלת היתרי בנייה צוין כחסם לתיעוש. עוד צוין כי גם פרויקטים רבים של דיור למשתכן תקועים בגלל תהליך הרישוי. על מנת להתחיל בייצור מודולים במפעל צריך סגירה מוחלטת של היתר הבנייה.

חסם הידע

המשתתפים ציינו שאין בעיה של ידע מתכננים; סופר על יישום בעבר של יחידות שירותים מודולריות בפרויקטים בהצלחה. בנוסף לכך גם היצרנים טענו שאין בעיה של ידע הנדסי, אך לצורך ה"פריצה" צריך שיהיה שינוי תרבותי. קביעה זו נוגדת לכאורה את הממצאים שעלו בשאלון האינטרנטי שהעלו כי היעדר היכרות עם הטכנולוגיה הוא חסם מהותי ביישומה.

חסם האיכות והתרבות

משתתפים טענו שהסטיגמה של בנייה טרומית כמוצר נחות מושרש עמוק בתרבות הישראלית ויהיה קשה לגרום לשינוי תפיסה שיזים אותה. מסיבה זו ברור כי בניסיון להחדיר את השיטה יש לשים דגש על איכות המוצר, שאם לא כן יידון הניסיון לכישלון. נציג אשטרום ציין שפרויקט במרכז אמריקה, בו בנו ביחידות תלת ממדיות, הראה תוצאה של מוצר נחות. נציג מנרב פלדות טען כי ניסיון החברה לייצר מבנים טרומים למגורים נכשל, והוסיף כי לדעתו בנייה כזו למגורים לא תוכל להיות רלבנטית ב-20-30 השנים הבאות.

7.3 התכתבות ודין עם גורמים מקצועיים בחו"ל

כפי שנראה להלן יישום שיטת הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות נהוג מזה זמן רב בתעשיות הבנייה ברחבי העולם. לאחרונה נראה במקומות שונים כי הביקוש הגובר ליחידות דיור למגורים, לעומת המשאבים המוגבלים של תעשיית הבנייה לספק ביקוש זה, אינו נחלת שוק הבנייה הישראלי בלבד

(Farmer 2016, Building and Construction Authority). עיון במצב תעשיית המבנים המודולריים במדינות שייסקרו להלן מראה מאמץ של גורמים שונים, כגון השלטונות והאקדמיה, לעודד את הבנייה המודולרית ואף להסדירה בתקנות.

היחידה לבחינה ואישור של שיטות בנייה חדשות, הפועלת במסגרת המכון הלאומי לחקר הבנייה בטכניון, נמצאת בקשרים מקצועיים עם ארגונים מקבילים בחו"ל במסגרת ארגון ה-WFTAO (World Federation of Technical Assessment Organizations). לקראת הכנס השנתי שנערך בספטמבר 2018 באוסטרליה ננקטה יוזמה לעורר דיון בנושא הבנייה המודולרית בין הנציגים המשתתפים, על מנת לאבחן את המצב הקיים בעולם בנוגע ליישום השיטה, ללמוד על מניעים וחסמים ליישומה בארצות השונות, ולעמוד על ההתייחסות של התקינה במקומות שונים להקשרים המיוחדים לתעשיית המבנים המודולריים. כבסיס לדיון נשלחה לנציגים סקירת המצב הקיים בעולם כפי שיתואר בפסקאות הבאות, ובהמשך נערך דיון בין הנציגים השונים. הדיון התבסס על שאלון מובנה המתייחס, מטבע הדברים, בעיקר להיבט שלשמו התכנס הפורום, דהיינו החלפת דעות בנושא תקינה ואישור של שיטות בנייה חדשות.

אוסטרליה

הבנייה המודולרית באוסטרליה עדיין לא נכנסה ליישום נרחב, זאת כתוצאה של קשיים טכניים, אי וודאות רגולטורית, ומוניטין של איכות ירודה (Monash university 2017). אוניברסיטת מונאש הוציאה לאור מדריך לתכנון מבנים בשיטה המודולרית, אשר לא רק מכסה היבטים טכנוניים אלא גם מדגיש היבטים אחרים כגון הובלה ובטיחות בהקמה.

Gardiner (2015) מתאר מקרה בחן של בניין מגורים בעיר Darwin בחופה הצפוני של אוסטרליה, שבוצע בטכנולוגיית הבנייה המודולרית. "מגדל סוהו" (The SOHO Tower) בן 29 קומות שהוקמו על גבי חניון תת ועל קרקעי. המבנה תוכנן בתחילה בשיטה הקונבנציונלית, קיבל את ההיתרים הדרושים ואף נמכר לרוכשי הדירות. לאחר מכן התקבלה החלטה בהנהלת הפרויקט לעבור לשיטה המודולרית עקב אילוצים של עלות וחוסר כח אדם מקצועי. היחידות המודולריות יוצרו בעיר Ningbo בסין והובלו לאתר הפרויקט בהובלה ימית. היחידות תוכננו לעמוד בדרישות של מערכת התקינה האוסטרלית. החומרים ששימשו את המפעל בסין, כגון פלדה, ברזל זיון, אביזרי אינסטלציה וכלים סניטריים נבחנו על ידי מעבדות מורשות עי ידי הרשויות האוסטרליות [National Association of Testing Authorities (NATA)]. הלקחים מפרויקט זה הובילו את התכן של פרויקט נוסף בן 50 קומות.

האיחוד האירופי

פרויקט MODCONS (MODular CONStruction) נוסד על ידי ה-European Commission בשאיפה לפתח ולהרחיב את השימוש בבנייה מודולרית תלת ממדית בבנייה למגורים במדינות המשתתפות (ספרד, פורטוגל, פינלנד, בריטניה, ועוד). הפרויקט חולק לשש קבוצות עבודה כאשר לכל

אחת מהן שטח טיפול כדלקמן: (1) תכן מבני ובדיקות פיסיקות; (2) נושאים ארכיטקטוניים וטיפולוגיים; (3) תכן סיסמי; (4) קיימות; (5) תכן אקוסטי; ו-(6) החדרה והטמעה של השיטה.

על מוצרים ושיטות בנייה החוסים תחת מטריית התקינה האירופית הכוללת (the harmonized European Standard) לשאת את תו התקן האירופי (CE marking). בנוסף לכך, אם המוצר הוא חדשני ואינו כלול בתקינה הכוללת, עליו לעבור את ההערכה הטכנית האירופאית (ETA European Technical Assessment). במסגרת פרויקט ה-MODCONS פורטה רשימה של קטגוריות שונות של דרישות רגולטוריות השימות בהקשר של הבנייה המודולרית, ורובן ייחודיות לטכנולוגיה זו. יתירה מזו – הודגש כי הטכנולוגיה המודולרית אינה מתאימה למסגרת התקינה הסטנדרטית ולכן עליה להיות כפופה להנחיות [ETAGs – European Technical Assessment Guidelines] אם ברצון היצרן לשאת את תו ה-CE marking (MODCONS 2015). לצורך כך הוצאו ההנחיות ETAG 23, הן ביחידות מבנה המיוצרות מחוץ לאתר ו-ETAG 24, הן ביחידות מודולריות ממסגרות פלדה. מסמכים אלה יכולים להוות בסיס לאישור שיטות בנייה מודולרית בארץ כאשר תוגשנה לאישור בבוא הזמן.

כמה מהממצאים של פרויקט MODCONS הם: (1) ניתן ליישם את התכן הקונסטרוקטיבי של שיטות בבנייה מודולריות בעזרת ה-Eurocode 3 תוך שימוש בתוצאות של בדיקות מיוחדות; (2) מבנים רבי קומות המיישמים טכנולוגיה זו יצטרכו להכיל מערכות מבניות נוספות או גרעין מבטון; ו-(3) תכן אדריכלי יצירתי ייתן את התשובה לדרישות לבניינים מודרניים שייבנו בבנייה המודולרית.

יפן

Buntrock (2017) ציין כי יפן ידועה ברחבי העולם בתעשיית מפותחת של מבנים מודולריים, תעשייה שהתפתחה לאחר מלחמת העולם השנייה. רוב היצרנים (המכונים "home makers", מונח ביפנית המתייחס לחברות העוסקות בייצור של יחידות דיור מחוץ לאתר) החלו את דרכם בשנים שלאחר המלחמה. בשנת 1964 ייסד המיניסטריון למסחר ותעשייה בינלאומיים (the Ministry of International Trade and Industry) את הארגון של היצרנים והספקים של בנייה מודולרית [the Japan Prefabricated Construction Suppliers and Manufacturers Association (JPCMSA)] במטרה לקדם את הפרקטיקה, לפתח ולהטמיע מחקרים, ולחבר תקינה בנושא. במהלך השנים האחרונות (מאז שנת 2000) חלקם של ה-"home makers" הגיע לכ-15% מנפח השוק הכולל של הבנייה למגורים ביפן. החברות הגדולות נוטות להתחרות בבנייה הקונבנציונלית (וגם זו בזו) על ידי הבטחת איכות משופרת והארכת תקופות הבדק.

ביפן נמצא היצרן הגדול ביותר של מבנים מודולריים, "Sekisui Heim", בעל כושר ייצור מוצהר של 90 מודולים ביום. חברות מודולר אחרות הם "Misawa Homes" ו-"Toyota homes".

סינגפור

רשות הבנייה "Singapore Building and Construction Authority" בסינגפור מובילה את המאמץ לקדם את הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות בשאיפה מוצהרת להגיע לפלח שוק של 35%

מכלל הפרויקטים היזומים על ידי הממשלה. פתרונות והיבטים שונים של הבנייה המודולרית רוכזו בספר "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA)". במדריך זה מתוארים בקווים כלליים שני טיפוסים של מודולים, האחד מבוסס על מבנה פלדה (במשקל של 15 עד 20 טון) והאחר על מבנה בטון (בטווח משקלים של 20 עד 35 טון). יש לציין כי משקלו הנמוך, יחסית מהצפוי, של המודול מבטון מתקבל על ידי ביצוע בטון רק בשני קירות האורך וברצפה. קירות הרוחב מבוצעים על ידי אלמנטים קלים ואילו הפתרון לתקרת המודול, מעל המערכות וקונסטרוקציית פלדה זמנית, מתקבל על ידי רצפת המודול שמעל. פרויקטים רבים של בנייה מודולרית מבוצעים כיום בסינגפור, ביניהם הפרויקט "Clement Canopy Condominium", סדרת מבנים בני כ-40 קומות המורכבים, בסך הכל, מ-1,866 מודולים.

בריטניה

הירידה בכוח האדם המקצועי בבנייה, יחד עם הדרישה הקבועה לבנייה של יחידות דיור, הובילו את הממשלה למאמץ ליזום פעולות המיועדות להפחית את פגיעותה של תעשיית הבנייה למחסור בידיים עובדות מקצועיות. ה-"Construction Leadership Council" מינתה את Mark Farmer, מנכ"ל של חברת יעוץ בנושא בנייה ונדל"ן, להוביל מאמץ מחקרי ולהציע פתרונות בנדון. כותרת דו"ח המחקר המסכם, שנקרא "דו"ח פארמר" (The Farmer Report), מצהירה שעל תעשיית הבנייה "להתחדש או לחדול" ("modernize or die"). עוד ציין המחבר כי, בהינתן האיום הקבוע של הירידה במספרי הידיים העובדות, יש לאמץ גישה חדשה, המוגדרת כאפיון מודלים עסקיים חדשים ושימוש בשיטות בנייה חדשניות.

בין יתר ההמלצות העיקריות המצוינות ניתן למנות את קידום גישת הייצור במפעל (pre-manufacturing) ושינוי המודלים העסקיים לשם כך (מאמץ שצריך להיות מובל על ידי המגזר הפרטי), קידום פרויקטים של דיור בר השגה העשויים מבנים מודולריים (מאמץ שצריך להיות מובל על ידי הממשל), ובטווח הרחוק קידום חדשנות על ידי הקמת מפעלים לייצור מודולרי או סוגים אחרים של מחקר ופיתוח (מאמץ שצריך להיות מובל על ידי הממשל). ניתן להיווכח כי, גם לדעתו של Farmer, המאמץ להחדרת הטכנולוגיה של הבנייה המודולרית, הכולל קידום פרויקטים והקמת אמצעי ייצור, אמור להיות מובל על ידי הממשל. זאת בדומה לדעה הרווחת בארץ כפי שמצאה את ביטויה בשאלון האינטרנטי (תת-פרק 7.1) ובמפגש הסיעור-מוחות שנערך במסגרת מחקר זה (תת-פרק 7.2 – נושא: החסם הכלכלי).

Farmer (2016) מתאר פרויקט "Creekside Wharf project", אשר יישם את השיטה המודולרית בהיקף משמעותי. הפרויקט נבנה על ידי היזם Essential living המתמחה בייזום והפעלה של דיור להשכרה. במסגרת הפרויקט נבנו שני מבנים, האחד בן 23 קומות והשני בן 12 קומות. בתקופת כתיבת הדו"ח היה הפרויקט בתהליך ההקמה בשטח. היחידות המודולריות יוצרו על ידי Elements Europe

במפעל בסביבה מפוקחת. הפרויקט מכיל 653 יחידות מודולריות המרכיבות יחדיו 249 יחידות דיור להשכרה, בנות שניים או שלושה חדרים (חדר שינה אחד או שני חדרי שינה).

הבניין הגבוה ביותר שנבנה והושלם בשיטה המודולרית בעת פרסום הדוח הוא "Wembley Victoria Hall", שנבנה על ידי חברת FutureForm. ייחודו של הבניין הוא צורתו העגולה שעוצבה על ידי יחידות מודולריות מיוצרות במפעל שנערמו סביב גרעין מבטון יצוק באתר. ממדי המודולים היו עד 16 מ' אורך ו-3.8 מ' גובה, ובמשקל עד 16 טון. בניית המבנה התחתון וגרעין המבנה, שניהם מבטון יצוק באתר, התחילה בתחילת יולי 2010 והרכבת המודולים ארכה כ-15 שבועות. הפרויקט כולו הושלם באוגוסט 2011 (MODCONS case study FutureForm Wembley).

ארצות הברית

המחלקה לשיכון ולפיתוח עירוני [department of Housing and Urban Development (HUD)] יזמה בסוף שנות הששים של המאה הקודמת תכנית המיועדת לשיפור תהליך הבנייה של דיור בר השגה. בסיכומו של דבר התכנית, שנקראה "Operation Breakthrough", לא הובילה לשינוי משמעותי בתעשיית הבנייה בין היתר עקב חוסר התעניינות של רוכשים וכתוצאה מכך ירידה במימון שהבנקים היו מוכנים להעמיד לפרויקטים. יחד עם זאת, במהלך הפרויקט נקבע התקן למבנים מתועשים (Manufactured Home Construction and Safety Standard) שכונה לשם הקיצור "the HUD code" ואימץ את תוכנו בעיקר מתעשיית המבנים היבילים. התקן עוסק בעיקר במבנים קלים עשויים מקונסטרוקציית עץ המיוצרים מחוץ לאתר (Rupnik 2017).

כיום פועל בארצות הברית המכון לבנייה מודולרית [the Modular Building Institute (MBI)] שנוסד בשנת 1983. זהו ארגון ללא כוונת רווח המאגד בתוכו יצרנים, קבלנים, וסוחרים בשני תחומים עיקריים: (1) בנייה מודולרית קבועה (permanent modular construction PMC); ו-(2) מבנים יבילים (relocatable buildings RB). לדעת ה-MBI תקן ה-HUD אינו צריך להיות מיושם ברמה הפדראלית אלא יש להשאיר את הסדרת נושא הבנייה המודולרית בידי הרשויות המדינתיות. כל זאת מתוך הנחת יסוד כי אין צורך בתקן ייחודי לבנייה מודולרית היות ושיטה זו היא לדעתם רק דרך יעילה יותר להרכבת רכיבי בנייה (ModularAdvantage Q3 2016). לפי הערכת ה-MBI פלח השוק שנשלט על ידי הבנייה המודולרית בארה"ב עומד על כ-2.9%. על סמך הערכה זו הוגדרה בשנת 2015 התכנית "5 in 5", השואפת להגיע לנתח שוק של 5% תוך חמש שנים, דהיינו עד שנת 2020.

בדומה לתפיסה של ה-MBI אף ה-International Code Council (ICC) אינו עוסק, מתוך מדיניות, בתהליך של ייצור והרכבת המודולים עצמם אלא ברכיבים השונים המרכיבים את המודולים, כגון רכיבים מבניים וחלקי מערכות. בהתאם למדיניות זו הדו"ח שפורסם על ידי ה-ICC, המאשר בנייה במכולות ימיות (ICC-ES AC462) דן במכולה עצמה כחומר בנייה ולא במערכת הכוללת של מבנים העשויים ממכולות.

7.3.1 הדיון במסגרת כנס WFTAO, אוסטרליה, ספטמבר 2018

בסיכומה של סקירה זו נרשמו נקודות לדיון כדלקמן (יש לציין כאן כי אופי השאלות שהועלו לדיון תואם את האוריינטציה המקצועית של הקבוצה, דהיינו דיון בעיקר בנושאי אישור, תקינה, וליקויי ביצוע):

- האם נושאים טכניים הנוגעים לשיטה צריכים להיות נדונים כחלק ממערכת התקינה הכוללת, או שיש צורך לפתח תקנים ותקנות המיוחדים הנוגעים לה?
- האם יש צורך לחייב את היצרנים השונים לקבל אישור לשיטה או לדגמים המיוצרים על ידם, או שיש להשאיר זאת לאישור על בסיס וולונטרי?
- האם יש בידכם ידע/מידע מצטבר אודות ליקויים חוזרים בפרויקטים המיישמים את השיטה המודולרית?
- האם לדעתך המאמץ ליישום השיטה המודולרית צריך להיות מובל על ידי הרשויות, או שיש להשאיר זאת לכוחות השוק?
- למיטב ידיעתך, מה מידת השימוש בשיטה המודולרית במדינתך יחסית לשוק הבנייה?

תמצית הדיון ותשובות שהתקבלו:

תשובת Gerhard Breitschaft, נשיא ה-DIBt (Deutsches Institut für Bautechnik) גרמניה:

רוב הנושאים הנוגעים לבנייה המודולרית ניתנים לטיפול על ידי מערכת התקינה הקיימת, יחד עם זאת ישנם מספר נושאים (לא פורט אילו נושאים) המצריכים טיפול על ידי מערכת התקינה או האישורים. אין צורך בהתערבות של המדינה אלא רק כאשר יוצג לביקורת מוצר חדש לחלוטין.

בעבר וגם היום המראה האדריכלי החיצוני של הבנייה המודולרית מהווה נקודת תורפה של השיטה.

יש צורך בהתערבות, הן של הממשלה והן של המגזר הפרטי לצורך קידום הבנייה המודולרית.

פלח השוק הנוכחי של הבנייה המודולרית עדיין נמוך, אך צפוי לעלות בצורה משמעותית בעתיד הקרוב.

יש לשאוף להחדרה מחדש של הבנייה המודולרית לתעשיית הבנייה. בעבר שכונות שלמות נבנו בבנייה מודולרית, והתוצאה הייתה גרועה. רעיונות אדריכליים חדשים, יחד עם שיפור בטכנולוגיה, יכולים להביא לתיקון התמונה והבאת היתרונות הכלכליים של השיטה לידי ביטוי אף בהיבט המסחרי. ישנה כעת אפשרות לייצור של המודולים באיכות גבוהה תוך חיסכון ניכר במשאבים.

תשובת Bruno Mesureur מנהל השיווק והפיתוח הבינלאומי, CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), צרפת:

הנושאים הטכניים בנוגע לבנייה המודולרית מטופלים ברובם על ידי ה-ETAG 23; בנוסף לכך ישנם נושאים נוספים האמורים להיות מטופלים על ידי מערכת האישורים המדינתית. אמנם מערכת האישורים בצרפת אינה מחויבת על פי התקנות, אך יש לתת את הדעת על נושאים האמורים להיות מכוסים על ידי התקינה, כגון בידוד תרמי, אקוסטי, ועמידות באש.

כיום הרושם המתקבל כאשר דנים בבנייה המודולרית הוא של בנייה זולה ברמה נמוכה, אך זה רושם שאינו תוצאה של משוב מסודר כלשהו.

השלטונות בצרפת שואפים להפחית את העלויות של הבנייה למגורים, במיוחד במצבים רגישים כגון שיכון מהגרים או אוכלוסיות בעלות הכנסה נמוכה כגון מעונות סטודנטים. הוצע לעשות לשם כך שימוש בבנייה ממכולות ימיות, אך גם בנייה מודולרית ככלל יכולה לספק את הפתרון לכך.

תשובת John Thorpe, מנכ"ל CertMark International, אוסטרליה:

אין סיבה שיהיה שוני בין מבנה הבנוי בשיטה המודולרית לבין זה הבנוי בשיטה הקונבנציונלית בכל הנוגע לתכונות הנדרשות מהמוצר המוגמר והתאמתו למטרה שלשמה הוקם. עם זאת, עקב האופי המיוחד של תהליך ההקמה, יש לתת את הדעת על נושאים הנוגעים לרכיבי השיטה כמוצר שיוצר במפעל, כגון הדרך שבה יש לפקח על קבלת יחידות סגורות כאשר אין אפשרות מעשית, במהלך הפרויקט, להיכנס ליחידות לשם בקרת איכות.

באוסטרליה וניו זילנד על כל יצרן של מוצר בנייה להציג הוכחה על עמידות המוצר בדרישות התקנות. הוכחה זו מושגת בעזרת מסמכים וגם במידת הצורך בבדיקות פיזיות בשטח.

לבנייה המודולרית ישנם יתרונות מוכחים בהיבטים של חיסכון בזמן וכסף. כפועל יוצא מכך על הממשלה ליזום פרויקטים של בנייה מודולרית בפרויקטים של דיור ציבורי ודיור בר השגה. המגזר הפרטי יוכל לקדם את השיטה המודולרית על ידי פיתוח חדשנות, הן בתכן והן בביצוע.

כיום הבנייה המודולרית היא מגזר המתפתח ביותר בתעשיית הבנייה באוסטרליה, "אך עדיין מקיפה 12% בלבד מנפח הבנייה".

התקן לבנייה מודולרית שפותח באוסטרליה מהווה בסיס איתן לתהליך של קבלת השיטה על ידי השוק. בעבר ייבוא של יחידות זולות מסין גרם למוניטין גרוע בכל הנוגע לשיטה. התקן לבנייה מודולרית נתפס כדרך לשפר את האיכות על ידי הסדרת הפיקוח.

תשובת Sean Balfe, מנהל תחום קיימות וסביבה, NSAI (National Standards Authority of Ireland) אירלנד:

יש לפתח תקנות תפקודיות המתייחסות לבנייה המודולרית. על כל שיטה של בנייה מודולרית לעמוד בבחינה של צד שלישי בלתי תלוי, שאינו שייך בהכרח למערכת הרגולטורית המדינתית.

המעורבות של המדינה בהחדרה של השיטה המודולרית תהיה רק ביצירת סביבה בה תוכל השיטה להיות מיושמת. התפיסה הכוללת היא שתהליכים כאלו צריכים להיות מובלים על ידי המגזר הפרטי.

סיכום הסקירה הבינלאומית

הסקירה שהובאה לעיל מקיפה את המדינות שנציגיהן נענו לסקר וכן את המקורות שאותרו בספרות. אין אנו מתיימרים להקיף את כל המדינות המיישמות בנייה מודולרית ויתכן כי ישנן מדינות בהן השיטה

באה לידי ביטוי אך לא איתרנו מקורות המעידים על כך. יחד עם זאת הודגם כאן מגוון רחב של התייחסויות לשיטה המודולרית, ולחסמים ולגורמים המניעים ליישומה. ניתן לבודד נושאים מספר המאפיינים את הדרך שהבנייה המודולרית אמורה לעבור בעתיד הקרוב כדלקמן:

בעולם המערבי קיימת מגמה של ירידה בכמות כוח האדם המקצועי הזמין לצורך מתן מענה לדרישות השוק לבנייה של יחידות דיור (גרמניה, בריטניה, צרפת, אוסטרליה). ההכרה הרווחת היא כי תיעוש הבנייה, עד כדי "אימוץ גישות ייצור חדשות" (דו"ח פארמר, בריטניה), יכולה לתת מענה להגברת הייצור של יחידות דיור. ניתן לראות כגורם מעכב את העובדה כי הבנייה המודולרית סובלת ממוניטין ירוד עקב ניסיון של איכות נחותה בפרויקטי עבר. יחד עם זאת ניתן להבחין בהכרה כי פתרון התיעוש עצמו, ביצוע מרבית העבודה בתנאי מפעל, ותכן אדריכלי חדשני יכולים להוות פוטנציאל לשיפור איכות הביצוע.

אף שמרבית הבנייה המודולרית כעת מקיפה בנייה נמוכה (ארה"ב) ניכרת מגמה של מעבר לבנייה מודולרית לגובה (אוסטרליה, בריטניה, ארה"ב) ואף לפרויקטי ענק בבנייה מודולרית (סינגפור).

ניתן להכפיף את הבנייה המודולרית למערכות התקינה הקיימות, אך ישנם נושאים הדורשים התייחסות ספציפית לבנייה המודולרית מחוץ למערכת התקינה. החדרת דרישות מיוחדות לבנייה המודולרית דרושה לצורך הגברת הפיקוח ותיקון המוניטין הגרועים של השיטה. באיחוד האירופי ניתן ליישם את הנחיות המדריכים ETAG 23, הן ביחידות מבנה המיוצרות מחוץ לאתר ו-ETAG 24, הן ביחידות מודולריות ממסגרות פלדה. יש לציין מצד שני אף את ההכרה ההפוכה בארה"ב כי אין צורך בתקן ייחודי לבנייה מודולרית היות ושיטה זו היא רק דרך יעילה יותר להרכבת רכיבי בנייה.

החדרת השיטה המודולרית צריכה להיות מאמץ משותף של הגורמים הממשלתיים והשוק הפרטי, כאשר בראש ובראשונה יהיה על המדינה ליצור את הדרישה לפרויקטים מתאימים לבנייה מודולרית, והשוק הפרטי יצטרך לפתח את אמצעי הייצור הדרושים ליישום פרויקטים אלו.

7.4 דיון עם גורמים בכירים במפעלים בפולין

ב-13.5.2019 התקיים סיור בשני מפעלים של החברות פורטה פרו בלטביה וב-15.5.2019 במפעל של חברת DMD-Modular בפולין. בסיור הראשון השתתפו אדריכל דן רוטשילד, מנהל תחום חקיקה ובנייה במשרד הבינוי והשיכון ויו"ר וועדת הליווי של המחקר, וחבר צוות המחקר אדריכל ניר חן, ובסיור השני אדר' דן רוטשילד וחבר צוות המחקר, פרופ' יחיאל רוזנפלד. תיאור ממצאי הסיור מבחינת תהליך הייצור ומבנה היחידות מפורט בתת-פרק א-12 (מקרי בוחן). במסגרת הסיור התקיים גם דיון עם גורמים בכירים במפעלים הללו על נושאים שונים הקשורים לבנייה המודולרית, שעלולים להוות חסרונות ואפילו חסמים להחדרת הטכנולוגיה לישראל. השאלות לדיון נאספו מכל חברי צוות המחקר ומלווי, והועלו על הכתב לפני היציאה לסיור.

להלן סיכום תמציתי של השאלות והתשובות (רק כאשר התשובות שונות במובהק מצוינת התשובה של כל מפעל בנפרד):

1. מהו שטח המפעל? – שטח החלקה: 16,000 מ"ר, השטח הבנוי: 12,000 מ"ר.
2. תפוקת המפעל? – 1 עד 4 יחידות ליום.
3. כמה יחידות אפשר לאחסן במפעל בו בזמן? – כ- 40 עד 80 יחידות.
4. מהו מחיר דירה בטכנולוגיה זו, ואיך משתנה מחיר היחידות לעומת מספר הדירות הנבנות? – התשובה שנתנה לא הייתה ישירה כלל. במקום זה נאמר: כדי להתחיל פרויקט צריך הזמנה עבור כ- 3000 עד 5000 מ"ר לפחות, כלומר כ- 100-200 יחידות לפחות.
5. לאיזה סוג בניינים הביקוש הגדול ביותר (מגורים, משרדים, בתיל מלון, בתי חולים)? – פורטה מודולר – כל הסוגים, DMD – כל הסוגים למעט מגורים.
6. מהם הגורמים לביקושים הללו (התמחות המפעל, חוסר בכוח אדם באתרים, תנאי אקלים באתרים)? – כל הגורמים הללו.
7. מה דרוש להקמת מפעל מסוג זה, האם יש הכרח בעזרת ממשלתית? – יוזמה פרטית מספיקה בדרך כלל. בתחילת הדרך הייתה תמיכה חלקית ברכישת ציוד.
8. מה נדרש כדי להגדיל את הפופולריות של טכנולוגיה זו לבנייה למגורים (מחיר יחידה המהווה גורם מרתיע, תרבות, ידע)? – כנראה תרבות ודעות קדומות.
9. האם המפעל הוקם מלכתחילה לבנייה במדינה או לייצוא? – לייצוא.
10. האם מפעלכם הוא מסוג של "Mass production line"? – זה בתהליך, עדיין לא הגענו לשם.
11. כמה זמן חולף מקבלת הזמנה עד תחילת ייצור? – תלוי בגורמים שונים, אך בדרך כלל כ- 3 חודשים.
12. אם אילו סוגי תוכנה אתם עובדים? – כל סוגי BIM, Revit, Tekla, Solidworks.
13. מהו הבניין הגבוה ביותר שנבנה בטכנולוגיה שלכם? – בין 8 ל- 20 קומות. בעולם ראינו גם פרויקט של 32 קומות ויתר.
14. מי מתכנן את המבנה של היחידות ורכיבי ההקשחה שלהן, ומי אחראי על התיאום הקונסטרוקטיבי עם המבנה המבוצע באתר אליו מתחברות היחידות? – תכן הקונסטרוקציה מתואם היטב בין מהנדס המבנים של המפעל לבין מהנדס המבנים של היזם.
15. האם בניתם אי פעם בנייני ממגורים עם דירות למכירה? – פורטה מודולר: כן. DMD: לא.
16. לדירות למכירה, האם ניתן לספק גימורים שונים בדירות שונות באותו בניין? – כן.
17. האם הלקוח הסופי יכול לבחור את הגימור והקבועות כרצונו? – כן, אך זה יגדיל את המחיר.
18. כמה זמן לפני תחילת הייצור צריך לספק מידע לגבי בחירות דיירים כנ"ל? – ממש עד לפני תחילת הייצור של היחידות הרלוונטיות.

19. מה המגבלות שאתם מטילים על גודל יחידות (מבחינת קו הייצור והשינוע לחו"ל)? – רוחב של 3 עד 4 מ', אורך של 10 עד 12 מ'.
20. אילה מסמכים אתם מספקים לאתר הבנייה לצורך ההרכבה והחיבורים? – יש לנו צוות הרכבה משלנו שמקבל את כל התוכניות.
21. כאשר משנעים לחו"ל, מהי הכמות המינימלית של כל משלוח? – שוכרים אנייה שטוחה ייעודית למשלוח. הגודל והכמות בכל משלוח נקבעים על פי שיקול כלכלי.
22. האם לדעתכם תעברו יום אחד לייצור קטלוגי מוכן מראש כמו במכוניות, ללא התאמה לצרכי לקוח? – אנחנו נאהב זאת (אך כנראה שזה לא יקרה).

7.5 סיכום עמדות ומסקנות

יש הסכמה רחבה, הן בחו"ל והן בישראל, שהיתרונות העיקריים של הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל הם קיצור ניכר של משך הזמן הכולל של פרויקט הבנייה מרגע תחילת העבודות באתר הבנייה עד לסיומן המלא ותחילת האכלוס, והגברה ניכרת בפריור של כוח האדם הכולל העוסק בפרויקט. אלה למעשה היתרונות שמובילים את כל הגורמים המקצועיים במדינות שונות למסקנה שחשוב מאוד שהמדינה תסייע בקידום בנייה מסוג זה, וזאת על מנת לפתור בעיות של משך הבנייה הארוך שקיים במשקי הבנייה הכלל עולמיים, ואשר נובע מחוסר בכוח אדם ומהאופי של הטכנולוגיות הקונבנציונליות. ליתר היתרונות (הפחתת פסולת בנייה והקטנת הפגיעה בסביבה, שליטה טובה יותר בתהליך הבנייה והגברת איכות הבנייה, הבטחת תנאי עבודה טובים יותר ובטוחים יותר לכוח האדם בענף, וכד') שנמצאו על פי ממצאים מהספרות הכללית ועל פי השאלון המקומי וסיעור המוחות בארץ, חשיבות לא מבוטלת אך הם בלבד לא היו מהווים גורם מדרבן למסקנה הנ"ל.

הסכמה רחבה קיימת גם לגבי החסם שנובע מדעה קדומה בקרב גורמים שונים (כולל יזמים, אנשי מקצוע, ולקוחות) לגבי בנייה טרומית ומתנאי אי הוודאות שחסם זה מציב בפני יצרנים ויזמים פוטנציאליים. חסם נוסף שחוזר ומופיע הוא חוסר הגמישות להתאמה אינדיבידואלית של מוצר הבנייה לדרישות של לקוחות הרוכשים את דירתם, והמגבלות החלות על שינויים עתידיים (בעיקר כשהטכנולוגיה מבוססת על קירות נושאים). אי הוודאות ליזם שנובעת מחסמים אלה מובילה את מרבית הגורמים למסקנה שהמדינה צריכה להיות מעורבת בקידום הטכנולוגיה, על מנת לדרבן יזמים פוטנציאליים לפרוץ את המחסום הנובע מלקיחת סיכונים ולסייע להם במימוש היתרונות הגלומים בטכנולוגיה. חסמים נוספים שנמצאו, הן בחו"ל והן בארץ נובעים מחוסר היכרות ופערי ידע של גורמים מקצועיים ובהם ניתן לטפל בדרכים מקצועיות מוכרות, כגון: הכנת מדריכים, השלמת התקינה, ובדיקה שיטתית מראש של שיטות הבנייה ע"י גופים מוסמכים. ההנחה הבסיסית היא שיצירת תשתית הידע תשפיע גם על אדריכלים להפנים את הטכנולוגיה ולמצוא פתרונות יצירתיים להגברת ההיבט האסתטי של בנייה מסוג זה, שבעבר, בדומה לתחלואי הבנייה הטרומית בכלל באותו זמן, סבלה מחזות אחידה מדי ומחזרתיות משמימה שהיו בין היתר אחראים לתדמית הירודה של בנייה טרומית.

פרק 8 בדו"ח המחקר הנוכחי, יחד עם סקר הספרות המפורט בנספח א', מנסה לתת מענה מסודר ושיטתי לחסמים שאותרו על מנת לאפשר החדרה מוצלחת של טכנולוגיית הבנייה המודולרית לישראל, ולאפשר למשק הבנייה ליהנות מיתרונותיה, ובעיקר מהיתרונות העיקריים של קיצור משך הבנייה והגברת הפיריון. המענה ניתן שם בשני אופנים, שלוקחים בחשבון את ממצאי השאלון האינטרנטי ומפגש סיעור המוחות:

א. תתי פרק 8.1 עד 8.5 הם מעין מדריך תמציתי המטפל בהיבטים האדריכליים, ההנדסיים והטכנולוגיים של הבנייה המודולרית. המידע הכלול בהם מיועד לסייע לגורמים המקצועיים (כגון, אדריכלים, מהנדסים, יועצים, מנהלי פרויקטים, מהנדסי ביצוע, בקרי איכות) בהשלמת פערי ידע ממוקדים, הנובעים מההיבטים הספציפיים של בנייה בטכנולוגיית המודולרית;

ב. פרק 8.6 עוסק בהיבטים הכלכליים של הבנייה המודולרית וכולל הצעה מפורטת למודל תמרוץ/פיצוי, שנועד לדרבן יזמים פוטנציאליים לנסות וליישם בישראל את הטכנולוגיית הבנייה הרוויה ולהחיש את תהליכי הבנייה תוך התגברות על המחסור בכוח אדם ובפיריון הנמוך המאפיין את הענף.

7.6 מראי מקום

Building and Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Prefabricated Prefinished Volumetric Construction". Building and Construction Authority, Singapore.

Buntrock, D., 2017, "Prefabricated housing in Japan". *Offsite architecture, constructing the future*, R.E. Smith and J. D. Quale Eds., Routledge, New York, NY, p190–213.

European Organization for Technical Approvals, 2006, "ETAG 023 guidelines for European technical approval of prefabricated building units," *EOTA*, Brussels.

European Organization for Technical Approvals, 2006, "ETAG 025 guidelines for European technical approval of metal frame building kits," *EOTA*, Brussels.

Farmer, M., 2016, "The Farmer review of the UK construction labour model," *Construction Leadership Council*, UK.

Gardiner, P., 2015, "The construction of a high-rise development using volumetric modular methodology". *Proceeding of the CTBUH 2015 international conference*, Wood, A. and Gabel, J. Eds. Now York, p136–143.

"Industry analysis – 2016 annual report", 2016, *Modular Advantage*, 2016(3), p26–57.

Lu, N., 2009, "THE CURRENT USE OF OFFSITE CONSTRUCTION TECHNIQUES IN THE UNITED STATES CONSTRUCTION INDUSTRY". *Construction Research Congress on Building a Sustainable Future*, ASCE, USA.

Monash University, 2017, "*Handbook for the design of modular structures*".

- “Report on conformity of developed systems with regulatory requirements”, 2015, *European Commission with Seventh Framework Programme*, MODCONS Grant agreement no. 315274,
- Rupnik, I., 2017, “Mapping the modular industry”. *Offsite architecture, constructing the future*, R.E. Smith and J. D. Quale Eds., Routledge, New York, NY, p55–76.

פרק 8: היבטים מקצועיים של בנייה מודולרית פוטנציאלית בישראל

תיאור כללי של הטכנולוגיה המקובלת בעולם עבור בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, ומיון שיטות הבנייה הרלוונטיות (לפי החומרים, טיפוס היחידות, ואופי המבנה השלם) נכללו בפרק 5.

היתרונות המוכחים (מחו"ל) של תיעוש הבנייה באמצעות הטכנולוגיה הנדונה (כמפורט בפרק 5, בפרק 7, ובנספח א'), לצד המחסור הגובר והולך בכוח אדם לא מיומן ורמת הבטיחות הירודה באתרי הבנייה, מובילים למסקנה שגם בישראל יישום של בנייה בטכנולוגיות מסוג זה עשויה להוביל לפריצת דרך בענף הבנייה על ידי תיעוש אינטנסיבי ושיפור מהותי של תפקודו (תת-פרק 7.1). יחד עם זאת, חלק ניכר של החסרונות המתגלים ביישום של טכנולוגיות חדשות, ובעיקר מהסוג הנדון, נובעים מחוסר היכרות והעדר ניסיון מעמיק עם פרטי הטכנולוגיה, המובילים לחוסר ידע מספיק בקרב הציבור המקצועי, מתכננים, יועצים ומבצעים כאחד. אחת המסקנות לגבי אופן ההתמודדות עם החסרונות, שנבעה הן מסקר הספרות והן מהבחינה של העמדות המקצועיות בישראל, היא שיש צורך להעמיד לרשות הציבור המקצועי את עיקרי הידע הדרוש באופן זמין ונוח, כך שלפי הצורך ידעו מראש מהן נקודות התורפה המחייבות שימת לב מיוחדת מראש.

הפרק הנוכחי נועד להקנות לציבור המקצועי בארץ את הנדבך הראשון בתשתית הידע הדרושה כדי ליישם בנייה מסוג זה בישראל.

הפרק כולל 6 תתי-פרק, לפי התחומים הבאים: היבטים אדריכליים (8.1), היבטים הנדסיים (8.2), היבטי מערכות שירות (8.3), היבטים טכנולוגיים וביצועיים (8.4), היבטי ניהול פרויקטים (8.5), והיבטים כלכליים (8.6). כל תת-פרק מציג סיכום תמציתי של הידע המקצועי הרלוונטי לבנייה המודולרית בתחום המקצועי הספציפי, כפי שהוסק מסקר הספרות, השאלונים הממולאים ע"י היצרנים, הסיורים במפעלים, ההתכתבות עם גורמים מקצועיים מחו"ל, וידע אישי של החוקרים. כמו כן כולל כל תת-פרק התייחסות לנושאים טכנולוגיים המהווים חסמים (כגון היבטים רגולטוריים, אילוצי מידות, התאמה לצרכי לקוח וגמישות לשינויים עתידיים). הנחת המוצא היא שהקורא הוא איש מקצוע בתחום המקצועי של תת-הפרק, ולכן אין צורך בהגשת ידע בסיסי בתחום וניתן להסתפק בהתייחסות ישירה לנקודות המיוחדות לבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל.

8.1 היבטים אדריכליים

8.1.1 הקדמה

פרק זה סוקר את ההשלכות האדריכליות של תכנון יחידות מגורים בבניינים הגבוהים מ-10 קומות המבוססות על בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות (להלן: בנייה מודולרית). הפרק מתחיל בסקירה של השלכות אפשריות של בנייה מודולרית על ההשתלבות במרקם העירוני, אח"כ דן הפרק בייחודיות של תכנון מגורים בארץ והשפעותיה על שימוש ביחידות מודולריות תלת ממדיות, ומצד שני ההשלכות של טכנולוגיות הבנייה הייחודיות בבנייה מודולרית והשפעותיהן על האפשרויות הקיימות כיום בבניית מגורים. הפרק יסתיים בהצגת תכנון מקרי מבחן של בניין מגורים/מלון רב קומות המבוסס על בנייה מודולרית, והצגת היתרונות האפשריים בתכנון בעזרת שיטת BIM בבנייה מודולרית תלת ממדית של בניין מגורים.

8.1.2 היבטים של השתלבות במרקם העירוני

בנייה מודולרית אינה שונה מבנייה רגילה באופן מהותי מבחינת האופן בו היא פרושה על הקרקע ומקושרת לתשתיות העירוניות. החלק המודולרי של בנייני מגורים מבוסס בדרך כלל על מסד/חניון הבנויים בבנייה רגילה. לפיכך, לא נראה שמבחינת אופן ההשתלבות במרקם העירוני יש הבדל מהותי בין בנייה מודולרית המבוססת על יחידות תלת ממדיות לבנייה רגילה. יחד עם זאת, קיים הבדל מהותי מבחינת טביעת הרגל האקולוגית של הבניינים והשפעתם על המרקם העירוני בזמן הבנייה. בבניינים בבנייה מודולרית תלת ממדית מרבית הבנייה נעשית במפעל והיחידות התלת ממדיות מגיעות מוכנות לאתר. ההרכבה באתר חוסכת זמן בנייה רב המתורגם באופן ישיר להקטנה בפגיעה/הפרעה לסביבה בתקופת הבנייה (ראה סעיפים 5.4, 8.5, 8.6).

8.1.3 ייחודיות הבנייה הגבוהה למגורים בארץ והשלכותיה על בנייה מודולרית

בנייה רגילה מושפעת מתנאי הסביבה ונעשית בתנאים פיזיים בעייתיים – תנאים הקשורים להשפעות מזג האוויר על אתר הבנייה והעבודה בו, בנייה בגובה, נגישות לאיזור העבודה בתוך הבנייה ונגישות לאתר הבנייה. בנייה בישראל בעייתית במיוחד בחודשי הקיץ בהן הטמפרטורות באתר הבנייה (שאינו ממוזג ומאוורר) קיצוניות, פוגעות ביכולת הפועלים להגיע לאיכות בנייה גבוהה ובעלות פוטנציאל לייצור בעיות בטיחות. תופעה דומה מתרחשת בחודשי החורף בהם הקור והגשם באתר הבנייה יוצר מפגעי בטיחות, מקשה על העבודה ויכול לייצר פגיעה בחומרי בנייה ובאלמנטים בנויים. בעיית תנאי הבנייה/אקלים יחד עם כוח העבודה הלא מיומן הם חלק מהסיבות העיקריות לפגיעה באיכות הבנייה ובאיכות הגמר במבני מגורים בארץ.

בנייה מודולרית למגורים מציגה יתרונות בהקשר לטיפול בשתי בעיות אלה. העבודה על מבנים מודולריים נעשית במפעל, סביבה מבוקרת מבחינה אקלימית שאינה כוללת עבודה על פיגומים

ובגבהים. העבודה נעשית ע"י כוח אדם מיומן כאשר כל הדרוש לבנייה נמצא בסביבה הבנייה ומתקיימת בקרה תמידית על איכות הבנייה. לפיכך בנייה מודולרית מציעה יתרון גדול מבחינת איכות הגמר בהשוואה לבנייה רגילה בישראל.

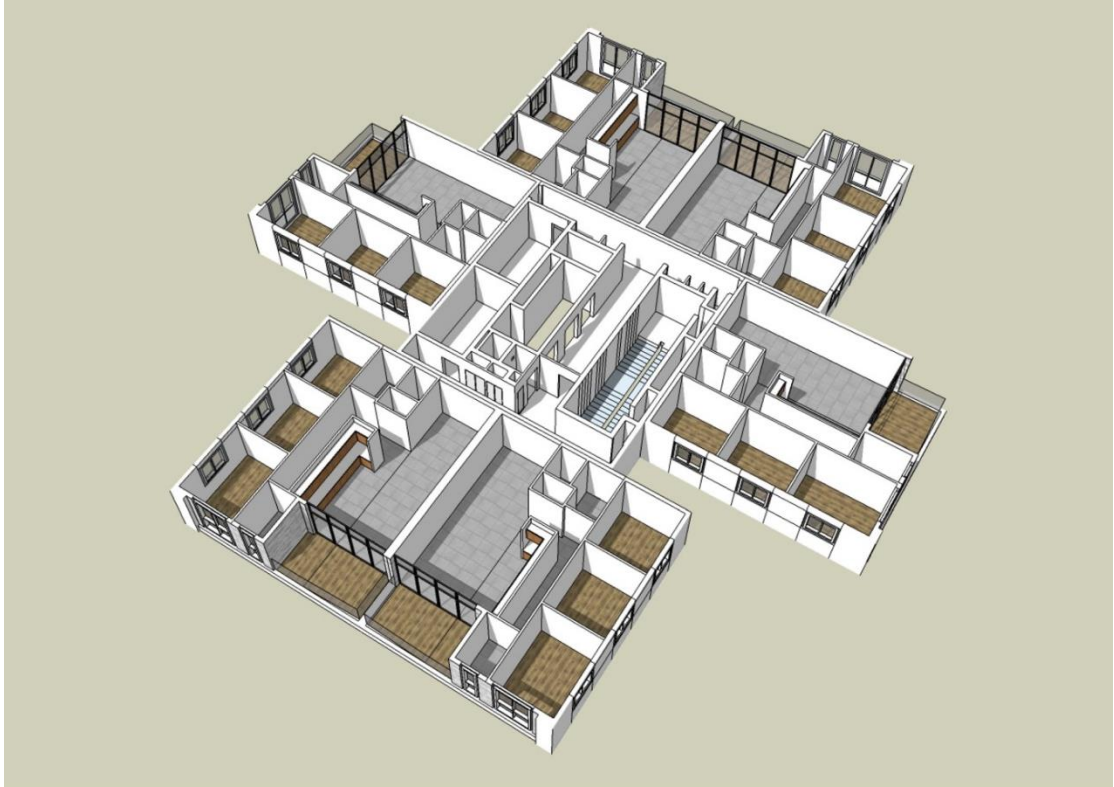
נושא ייחודי נוסף לבנייה בארץ הוא הצורך במרחב מוגן. קיימים שלושה כיווני פתרון עיקריים למתן מענה לצורך זה בבנייה רגילה. הפתרון המקובל במבני מגורים רגילים דוגל בבניית ממ"דים דירתיים מבטון כאשר לפחות 70% משטח המעטפת של הממ"ד אמור להגיע לקרקע. לכאורה, ניתן לבנות ממ"דים דומים (הצבה של יחידות מבטון אחת על השנייה עד הקרקע) בבנייה מודולרית ולהניף אותם לגובה. אולם, הנפות של חדרים מבטון במשקלים אליהם יגיע הממ"ד יחייבו היערכות מיוחדת מבחינת מינוף ונראה שזה לא יהיה כלכלי. לכן, כיוון זה לא נראה ישים. הכיוון השני הוא חיזוק חדרים מודולריים בפרטי מתכת המאושרים ע"י פיקוד העורף. פיתרון זה מבוצע כיום בבנייה רגילה במקרים מיוחדים בלבד בהם לדוגמה בניית ממ"ד רגיל אינה אפשרית. חיזוק מודול במתכת כך שיעמוד בתקני פיקוד העורף יביא גם הוא להגדלה משמעותית במשקל. להגדלה זו השלכות על הנפת היחידות לגובה באופן דומה ליחידות בטון. מחיר המתכת ומשקלה יהפכו כנראה גם כיוון זה ללא ישים מבחינה כלכלית.

הכיוון השלישי הוא שילוב ממ"ק (מרחב מוגן קומתי) בליבת המבנה. הליבה בנויה בבנייה קונבנציונלית בבטון בעזרת מערכת תבניות מטפסות ומשלבת בנוסף לממ"ק, חדרי מדרגות מוגנים מאש, מעליות ופירי מערכות. פתרון זה אינו חדש ומוכר בבנייה למגורים רגילה. היתרונות העיקריים של פתרון זה בבנייה רגילה קשורים להגדלת החופש התכנוני בתכנון חניונים (ביטול חלק מהעמודים שחייבים לרדת לקרקע בממ"ד רגיל). ליבת בטון בבנייה רגילה מאפשרת גם ריכוז כל מערכות התנועה ומעבר כל המערכות האנכיות בפירים מרכזיים. ציור 8.1.1 מציג דוגמה לליבת בטון מסוג זה המתאימה לשימוש בבניין מגורים רב קומות בבנייה מודולרית.

נושא נוסף בעל ייחודיות בבנייה למגורים בארץ הוא נושא כיווני האוויר. בתרבות המגורים הישראלית יש יתרון תודעתי לדירות בעל מספר גדול יותר של כיווני אוויר. נשאלת השאלה האם בנייה מודולרית תלת מאפשרת גמישות תכנונית מספקת להשגת 3-4 כיווני אוויר לדירות מגורים באופן שיהיה מקובל על הצרכן הישראלי.

בדיקה של אפשרויות התכנון בעזרת מודולים תלת ממדיים, המבוססים על פרטים שהתקבלו מחברות מובילות המייצרות כיום מודולים לבנייה למגורים, עלה כי הטכנולוגיה הקיימת מאפשרת לעמוד בדרישות השוק בהקשר זה ולהגיע למודל הדומה לבנייני מגורים קיימים בבנייה רגילה. ציור 8.1.2 מראה תוכנית קומה טיפוסית של בניין מגורים, המבוססת על ליבת בטון, ומאפשרת לפחות 3 כיווני אוויר לדירה, כמקובל בבנייה למגורים רגילה בארץ (פירוט נוסף על נקודה זו בפרק הדין במקרה המבחן). ציור 8.1.3 מדגים בניין בבנייה מודולרית, הכולל דירות עם מספר כיווני אוויר לכל אחת.

נושאים נוספים הקשורים להעדפות הצרכנים הישראלים הם המרפסת והצורך בחדרים רטובים במספר מקומות בדירה (מטבח, מקלחת ושירותים כללים, שרותי אורחים וחדר רחצה של יחידת הורים).



ציור 8.1.2: תוכנית קומה טיפוסית של מבנה מגורים בו הדירות מקבלות 3 כיווני אויר

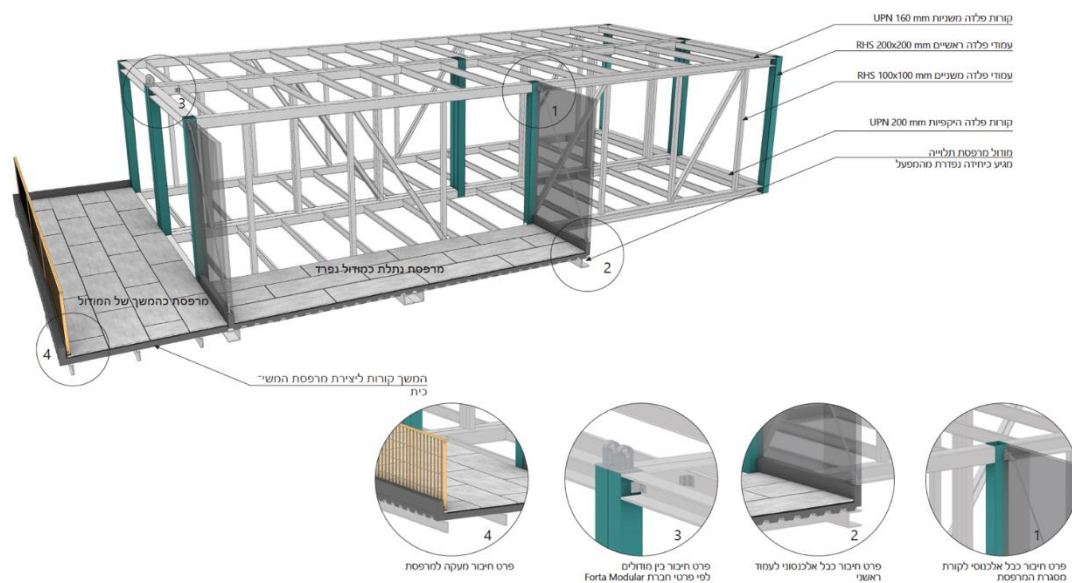


ציור 8.1.3: בניין מגורים המבוסס על יחידות מודולריות תלת ממדיות

המרפסת קשורה בדרך כלל לחדר המגורים ומגדילה את החלל הציבורי שמשמש לחיי משפחה ואירוח בימים/שעות בהם ניתן לשבת במרפסת מבחינת תנאי נוחות. בנייה מודולרית למגורים צריכה לאפשר תכנון מרפסות המחוברות לחדר המגורים. בדיקה שנערכה במסגרת עבודה זו מראה היתכנות ראשונית של מספר כיווני פתרון למרפסות הכוללים: חיבור של יחידות מרפסת למודול: שימוש בחלק ממודול כמרפסת ושימוש בגג של יחידה אחת כמרפסת של יחידה שנייה (ראה ציורים 8.1.4 ו-8.1.5). נראה שכיווני פתרונות אלה עונים על הצורך במרפסת בדירת מגורים ישראלית באופן שמראה שנושא זה לא יהווה מגבלה בתכנון דירות מגורים המבוססות על בנייה מודולרית.



ציור 8.1.4: אפשרויות פתרון למרפסות (למעלה שמאל: מרפסת סלון כחלק מיחידה מודולרית, למעלה ימין – מרפסת כיחידת נפרדת. למטה – מרפסת גדולה המבוססת על חלקים משתי יחידות מודולריות)

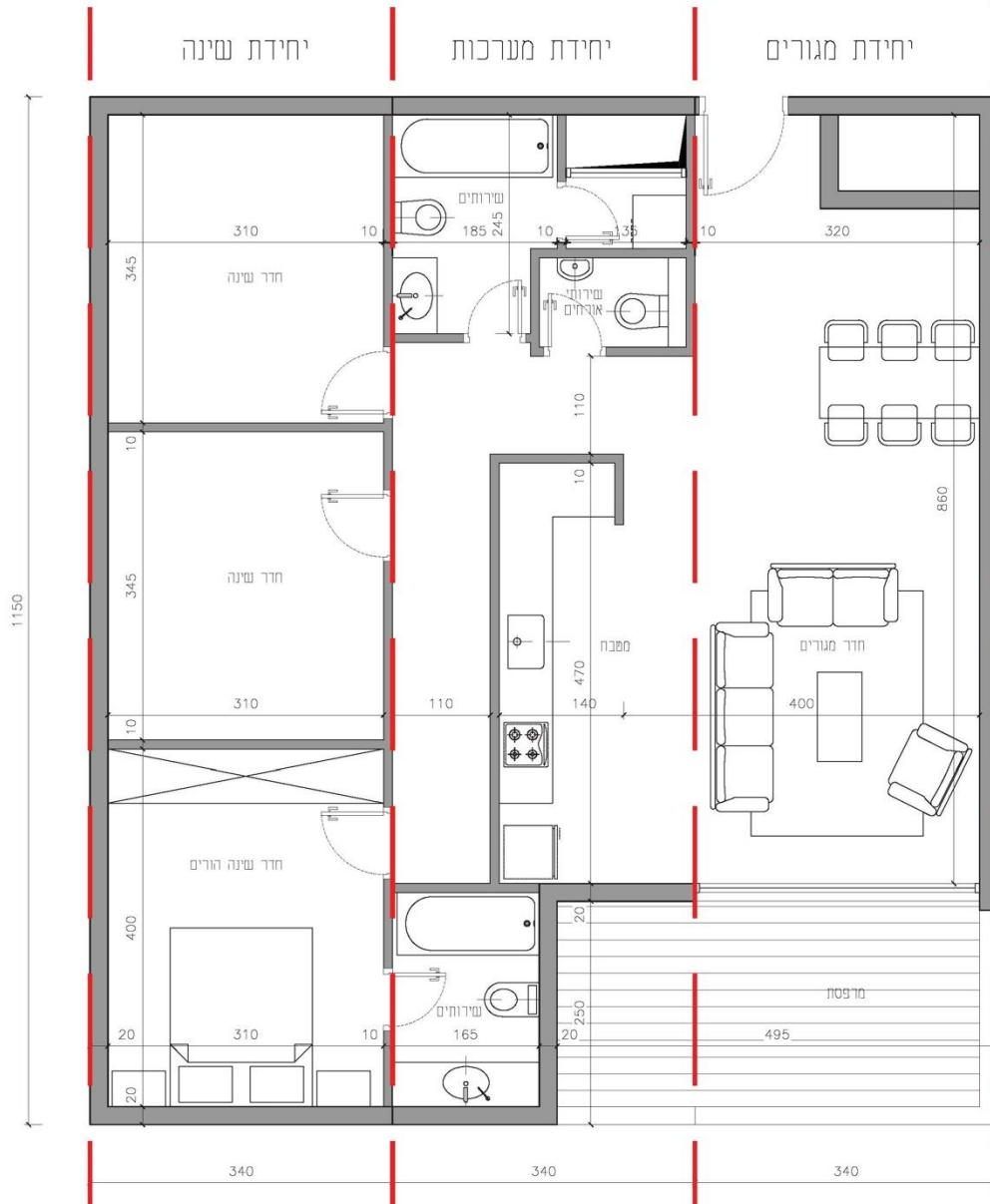


ציר 8.1.5: אפשרויות פתרון למרפסות – פתרון קונסטרוקציה (תמונה לקוחה מפרויקט הסטודיו בטכניון של הסטודנטית טל בן שמחון בהנחיית אדריכל ניר חן)

חדרים רטובים בבנייה מודולרית מחייבים התייחסות מיוחדת מבחינת אופן הגעת התשתיות והמחברים בין הקומות. קיימות שתי גישות מובילות לנושא: מעבר מערכות אנכי המשולב בליבה (core) מבטון תוך כדי העברת צנרת אספקה וניקוז דרך החלל בין שתי יחידות. הגישה השנייה מתייחסת ליצירת פירים אנכיים מקומיים העוברים בין כל הקומות. ניתן לבחור בכל פרויקט בגישה אחת או בשילוב של שתי הגישות. ציור 8.1.2 מציג שילוב של פירי מערכות בליבת בניין.

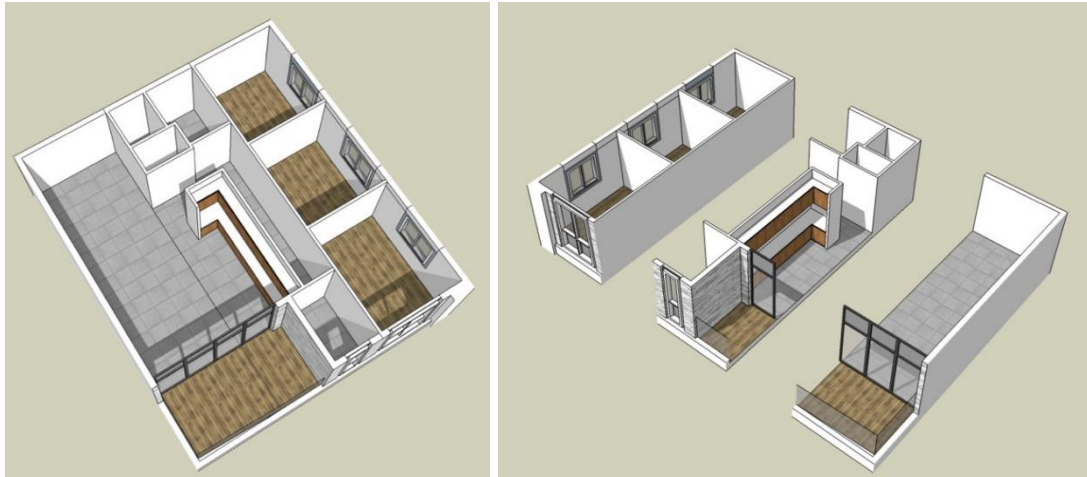
מבחינת תכנון הדירה עצמה נמצאו שתי גישות עיקריות בשילוב של חדרים רטובים בתכנון דירה. הגישה הראשונה, המינימליסטית, דוגלת בריכוז כל הפונקציות הרטובות בבניין ביחידה אחת. פתרון זה נראה חסכוני מבחינת מורכבות מעברי המערכות הנדרשים בבניין, אך מוגבל מבחינת היכולת לתת מענה לבניין עם סוגים שונים של דירות. דוגמא לפתרון מסוג זה ניתן לראות בציור 8.1.6, המציג תוכנית לדירה של שלושה חדרים המבוססת על שלושה מודולים באורך 11.50 מ' וברוחב 3.40 מ' (ראה גם הדמיה בציור 8.1.7).

האפשרות השנייה מאפשרת שילוב האזורים הרטובים במספר יחידות בדירה. אפשרות זו נותנת מענה לצרכים של יחידות מגורים גדולות/סטנדרט גבוה ומאפשרת מספר רב של חדרי אמבטיה ושירותים בדירה. אולם, בשימוש באפשרות זו יהיה צורך בהעברת מערכות בפירים אנכיים, מעבר לאלה העוברים בליבה, ו/או שימוש במרחב האנכי שבין קומות להעברת התשתיות לליבת הבניין. ציור 8.1.4 מציג תוכניות של דירות הכוללות אזורים רטובים במספר יחידות.



ציור 8.1.6: ריכוז המערכות בבניין ביחידה אחת – תוכנית

אחד האתגרים כיום בבנייה למגורים בארץ הוא הדרישה לתמהיל דירות מסוגים שונים בבניין. צורך זה נובע מהרצון ליצור הטרוגניות מבחינת אוכלוסיית המגורים בבניין/שכונת מגורים באמצעות עירוב שימושים ועירוב של אוכלוסיות בגלאים וצרכים שונים (ראה ציור 8.1.8). בהקשר לבנייה מודולרית אתגר זה מחייב אפשרות לשילוב בין יחידות שונות ליצירת סוגי דירה שונים. תת-הפרק הבא ינסה לענות על אתגר זה ולגעת בנושאים נוספים בהם יש לבנייה באמצעות יחידות מודולריות תלת ממדיות השפעה על בניית מגורים בישראל.



ציור 8.1.7: ריכוז המערכות בבניין ביחידה אחת – הדמיה

8.1.4 טכנולוגיות בנייה של מבנים מודולריים והשפעתם על התכנון האדריכלי של הבניינים

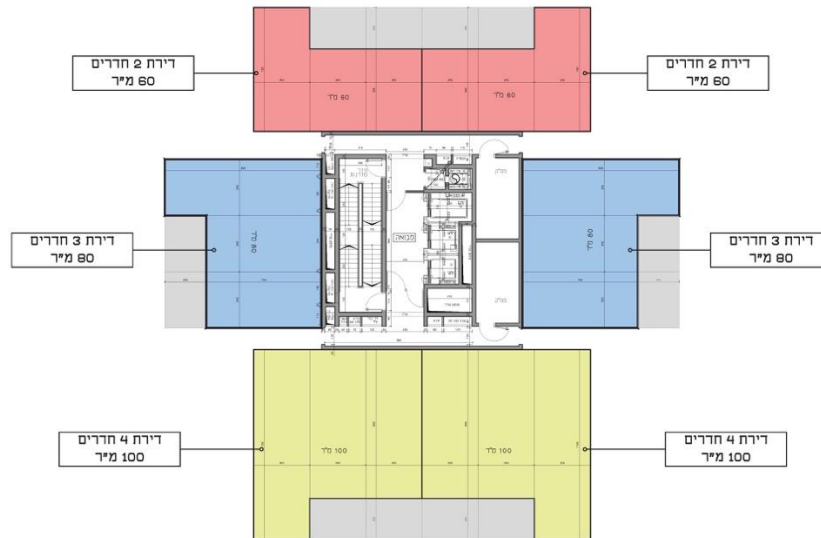
טכנולוגיית הבנייה של היחידות המודולריות שנבחנת בעבודה זו מבוססת על יחידות מודולריות ממתכת המתחברות לליבת בטון. פירוט הפוטנציאל והמגבלות הקונסטרוקטיביות של השיטה מופיע בפרק 8.2, הדן בהיבטי קונסטרוקציה. פרק זה בוחן את ההשלכות של שיטת הבנייה, העושה שימוש ביחידות מודולריות תלת ממדיות, על התכנון האדריכלי של בניין מגורים. השאלות שהפרק מנסה לענות עליהן נגעו, בין השאר, בהתאמת ממדי המודולים לשימוש במגורים, האם וכיצד ניתן להשיג סוגים שונים של דירות בעזרת שימוש ביחידות מודולריות? האם ניתן לשלב בין סוגים שונים של יחידות/דירות בבניין אחד לטובת שונות וגמישות בעיצוב? מה רמת הגמישות התכנונית של המערכת מבחינת הקשרים בין החללים, היכולת לפתוח פתחים ולשנות קירות, הקשרים בין חללים יבשים ורטובים ואפשרויות השינוי/ההגדלה של היחידה לאחר הבנייה?

מידות

יחידות מודולריות מגיעות באורך של עד כ- 12 מ' וברוחב כולל של כ- 3.40 מ' (ראה סעיף 5.2.2). מידות אלו (במיוחד מידת הרוחב) מתאימות ליצירת חדרי מגורים בגדלים טיפוסיים וחדרי אמבטיה/שירותים. היכולת לחבר יחידות מודולריות אחת לשנייה מאפשרת תכנון של חללים גדולים יותר. לכן, על מנת להגיע לגדלים הנדרשים לחללים ציבוריים (חדרי מגורים המשולבים במטבח) בדירות של שלושה חדרים ויותר, ניתן לחבר שתי יחידות.

בהתאם לכך, בנייה בעזרת יחידות מודולריות אמנם מגבילה מבחינת מידות, אולם נראה שניתן להתגבר על מגבלות אלו באמצעות שימוש נכון בחיבורים בין יחידות שונות. ציור 8.1.8 מציג תוצאה של בחינה שנעשתה במסגרת מחקר זה לפתח תוכנית של קומה טיפוסית של בניין מגורים גבוה,

המבוסס על יחידות תלת ממדיות מודולריות, עם דירות בגודל שונה. הבחינה מראה שניתן ללא קושי לשלב בבניין מגורים גבוה, דומה לבנייני מגורים קיימים (בניין H), יחידות דיור מסוגים שונים. פירוט על הבדיקה ויחידות הדיור השונות נתון בפרק הבא, המתאר את מקרה המבחן.



ציון 8.1.8: שילוב של מספר דירות בבניין המבוסס על בנייה מודולרית

8.1.5 התאמת דירות ושינויי דיירים

שינויים והתאמת דירות לאחר רכישה מושרשים בתרבות המגורים בישראל. לדוגמה, בבדיקה של פרויקט מדגמי ברמת בנייה בינונית גבוהה, שכלל 8 מגדלים ו-12 בניינים מרקמיים, עלה שבאופן ממוצע כל דירה יצרה כ-65 הוראות ביצוע בעקבות שינויי דיירים (Dayan, 2017). יחד עם זאת למפעלי בנייה מודולרית יש קושי לתת מענה להתאמה אישית ולספק מגוון רחב של דרישות שונות של דיירים.

לדיון בנושא יש לחלק את השאלה תוך התייחסות לשני מצבים: 1. רכישת הדירה מתבצעת לפני שהיחידות המודולריות נכנסו לייצור במפעל. 2. רכישת הדירה מבוצעת כשהיחידות המודולריות כבר נמצאות בייצור או מאוחר יותר.

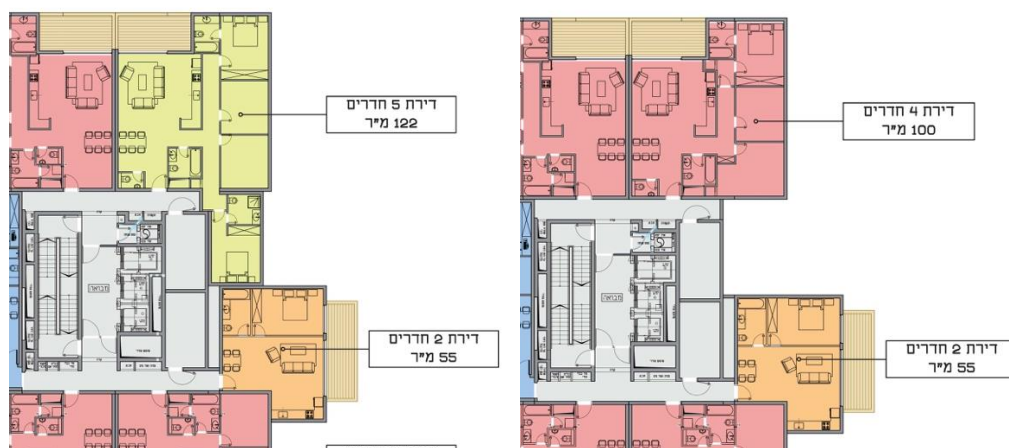
במקרה שרכישת הדירה מתבצעת לפני ייצור היחידות, מציעים כיום היצרנים של מבנים מודולריים שתי אפשרויות עיקריות להתמודד עם הנושא. האפשרות הראשונה מאפשרת ללקוח בחירה מתוך סט קבוע של אפשרויות לשינויים. סט זה יכול לכלול סוגים וגוונים שונים של צבע, אריחים, ריצוף וגם בחירה מתוך סוגים שונים של יחידות שלמות כגון יחידות אמבטיה, מטבח וכד'. ללקוח שהאפשרות הראשונה לא מתאימה לדרישותיו, האפשרות השנייה המוצעת היא לא להשלים חלקים בתוך היחידות, ולאפשר לדייר זה להשלים באופן עצמאי את הדירה לאחר מסירת הבניין. אפשרות זו יוצרת כמובן אתגרים בהקשר של הכנסת עבודות "מלוכלכות" לבניין גמור, תוך סכנת פגיעה בחומרים ופרטי גמר והפרעה לדיירים המאכלסים את הבניין.

במקרה שרכישת הדירה מבוצעת לאחר שהמפעל החל או סיים את ייצור היחידות המודולריות, הנטייה של חברות הבנייה היא לאפשר הכנסת שינויים רק לאחר מסירת הבניין, וזאת על מנת למנוע ערבוב סוגים שונים של קבלים באתר במהלך ההקמה, מצב שיכול לפגוע בהתקדמות הפרויקט וליצור נזקים. לסיכום, בנושא של שינויי דיירים הטכנולוגיה של בנייה מודולרית מאפשרת גמישות קטנה יותר מהבנייה הקונבנציונלית, אך נותנת מענה מסוים להתאמה אישית. יחד עם זאת, כפי שנראה בסעיף הבא, לבנייה המודולרית יש יתרון אחר הקשור לאפשרויות שינוי, והוא נוגע לתוספות בנייה.

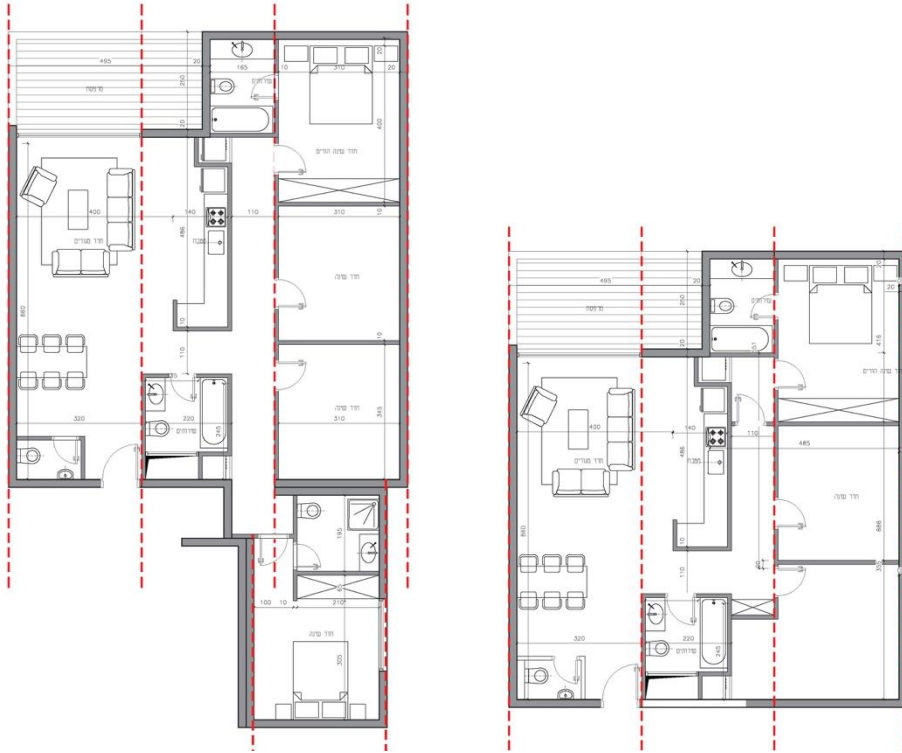
8.1.5.1 תוספות בנייה ושינויים

מכיוון שבנייה מודולרית מבוססת על מחברים יבשים ובנייה מפלדה, יש אפשרות לשלב בשלב התכנון אפשרויות לתוספות בנייה עתידיות. בניגוד לבנייה קונבנציונלית, הוספת יחידות מודולריות יכולות להיות פעולה פשוטה יחסית אם תוכננה מראש כאופציה בזמן תכנון הבניין (הכנת אפשרויות חיבור ליחידות נוספת והתאמה קונסטרוקטיבית של היחידות והמבנה). במקרה ובוצעו הכנות אלו מראש, המשמעות של הוספת היחידה תתבטא בפינוי חלק מהחזית אליו נדרשת היחידה להיצמד, הנפה של היחידה החדשה למקומה בבניין הקיים, חיבורה למבנה הקיים, וביצוע השלמות של איטום, בידוד, וחיפוי החזית באזור החיבור. ציורים 8.1.9 ו-8.1.10 מראים סכמה של תוספת בנייה מסוג זה.

למתן אפשרות לתוספות בנייה מסוג זה יכול להיות יתרון גדול בשיווק דירות למשפחות שידן אינן משגת דירות גדולות אך צופות לגידול בצרכים בעתיד. בנוסף, ניתן לתכנן מראש אפשרויות לתוספת באזורים שזכויות הבנייה הנוכחיות אינן מאפשרות הוספת שטחים אך יש צפי לשינויים עתידיים בתב"ע. שינויים מסוג זה יאפשרו גידול טבעי ותוספות בנייה מהירות תוך כדי הפחתה משמעותית של הפרעות/בעיות שיוצרות תוספות בנייה בבנייה קונבנציונלית.



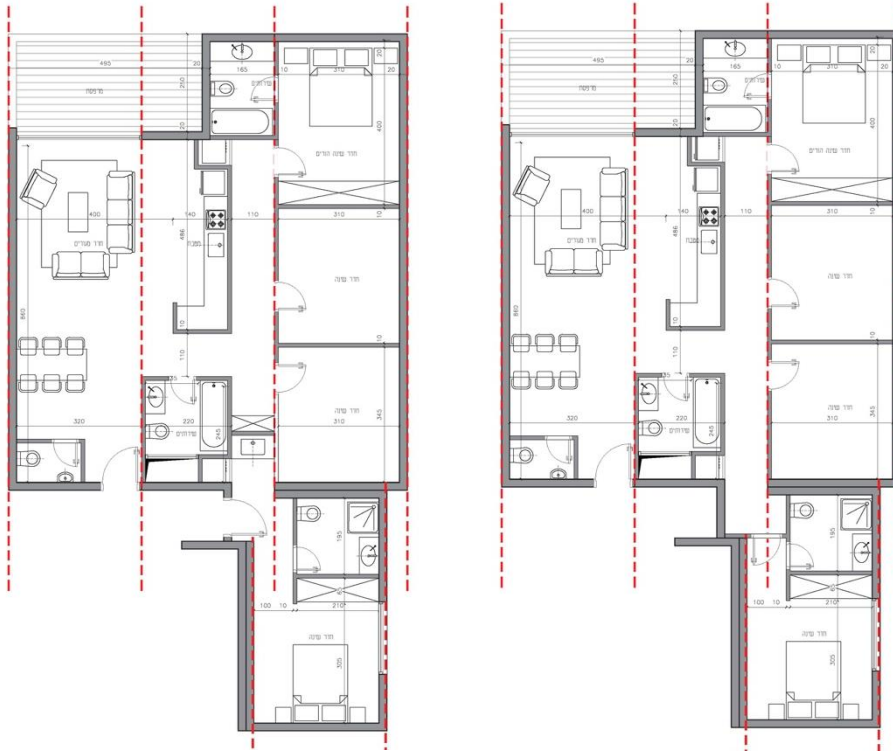
ציור 8.1.9: הוספת יחידות לבניין. ימין: מצב התחלתי. שמאל: תוספת יחידה של 20 מ"ר, הכוללת חדר שינה ואמבטיה והפיכת דירת 4 חדרים לדירת 5 חדרים



ציור 8.1.10: פירוט המודולים בהוספת היחידה לבניין. ימין: מצב התחלתי. שמאל: תוספת היחידה של 20 מ"ר, הכוללת חדר שינה ואמבטיה, לדירה המקורית בת 4 חדרים

אפשרות נוספת שתוספות בנייה מסוג זה מאפשרות היא גמישות בסוג התוספת. ציור 8.1.11 מציג שני מצבים אפשריים לשימוש בתוספת של יחידה. מצב אחד הוא הגדלת יחידה קיימת בחדר נוסף/יחידת הורים. האפשרות השנייה היא הוספת יחידה עצמאית קטנה (כ- 20 מ"ר) שיכולה לשמש כדירת סטודיו או כמשרד קטן לבעלי מקצועות חופשיים.

מבחינת הגמישות בתכנון החזית, בנייה מודולרית מאפשרת תכנון מכללי זיגוג מרצפה עד תקרה, באופן שמוגבל רק במגבלות של מיקום העמודים ומערכות ההקשחה – אלה ניתנים לקביעה בשלב התכנון. שינויים בחזית לאחר הבנייה אפשריים אך מוגבלים על פי מיקום העמודים ומערכות ההקשחה הקיימים. התכנון הפנימי ביחידות המודולריות נעשה בבנייה קלה לא נושאת, המאפשרת גמישות מבחינת שינויי חלוקה כל עוד לא משנים את מערכת הקונסטרוקציה.



ציור 8.1.11: הוספת יחידות לבניין. ימין: שימוש ביחידה כתוספת חדר מגורים/יחידת הורים. שמאל: תוספת יחידת סטודיו של כ- 20 מ"ר

8.1.6 פיתוח מקרה מבחן של מגדל מגורים בודד

פרק זה מציג תכנון ראשוני של בנין מגורים בן כ- 20 קומות, תוך התבססות על מגבלות התכנון של יחידות מודולריות קיימות הלקוחות ממפעלים בעלי ניסיון מוכח בבניית יחידות לבנייני מגורים גבוהים. התכנון המוצע מנסה להראות יכולת להגיע לבניין בעל חזות דומה לבנייני מגורים בישראל, תוך הצגת האפשרות לתמהיל דירות בגדלים שונים. בנוסף מראה התכנון השתלבות בנייה זו בקומפלקס גדול יותר של מספר בניינים בגדלים שונים (ציור 8.1.12).

המבנה מבוסס על מסד/חניון, הבנוי בבנייה רגילה, ממנו יוצאת ליבת בטון הכוללת את כל מערכות התנועה, ממ"ק ופירי המערכות/תחזוקה הדרושים. ציור 8.1.13 מציג את היחס בין המסד הבנוי בבנייה רגילה לחלק העליון הבנוי מיחידות מודולריות. ציור 8.1.14 מציג את השתלבות יחידות המגורים עם הליבה.

המבנה כולל 3 קבוצות של שתי יחידות דיור שונות בקומה. שתי דירות שלושה חדרים מסוג 1, שתי דירות שלושה חדרים מסוג 2 ושתי דירות ארבעה חדרים. תוכנית קומה טיפוסית של הבניין מוצגת בציור 8.1.15.

בהמשך לאמור בפרק הקודם, טכנולוגית הבנייה המודולרית מאפשרת תמהיל שונה של דירות ע"י החלפה פשוטה של יחידות מודולריות בהתאם לצרכי התכנון. ציורים 8.1.16 עד 8.1.22 מציגים אפשרויות שונות של דירות המתאימות לתכנון המוצע. דירות 2-3 חדרים מבוססות על שימוש ב- 2-3 יחידות מודולריות. דירות ארבעה חדרים מבוססות על שימוש ב- 3-4 יחידות מודולריות, ודירות של חמישה חדרים מבוססות על שימוש ב- 4 יחידות מודולריות.

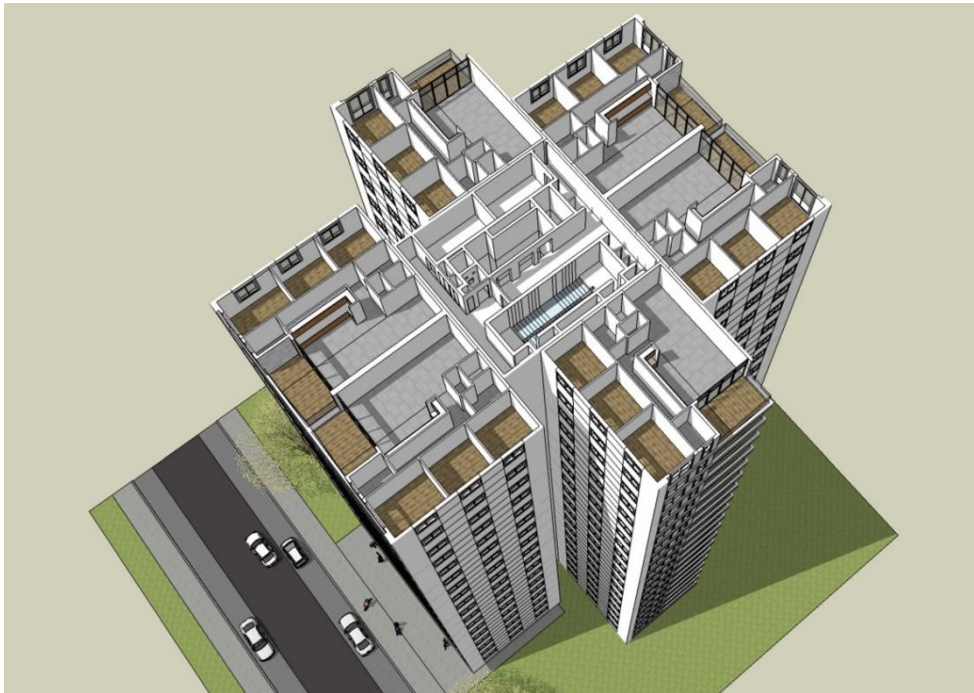


ציור 8.1.12: קומפלקס מגורים מיחידות מודולריות תלת ממדיות

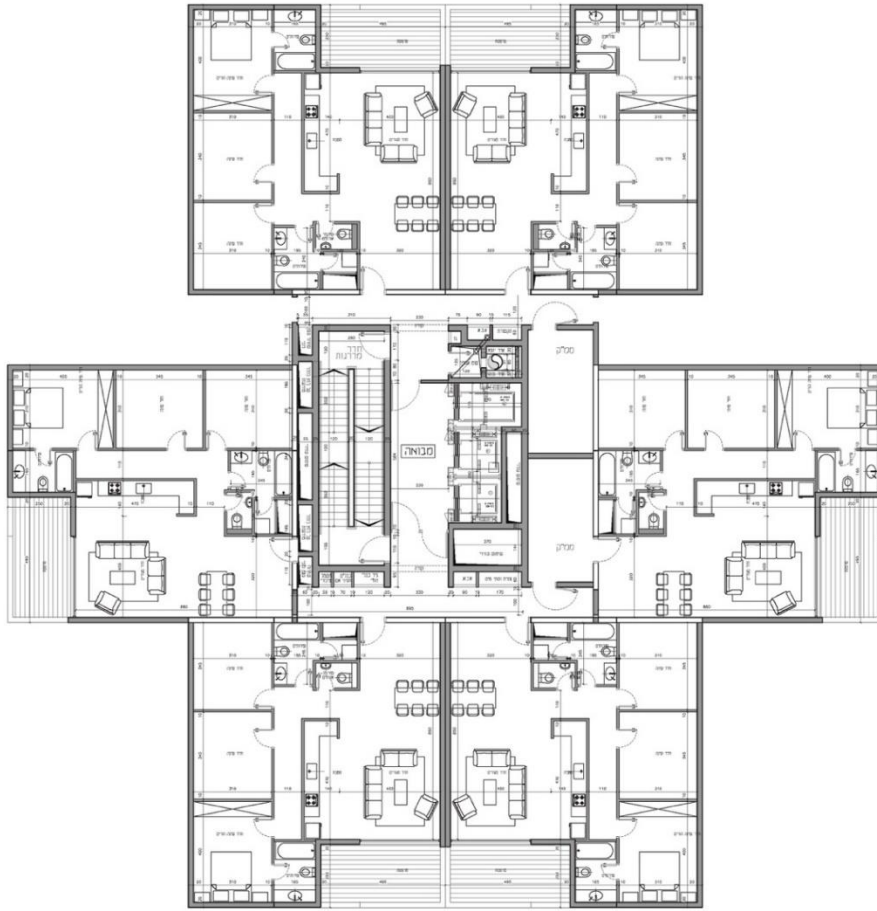




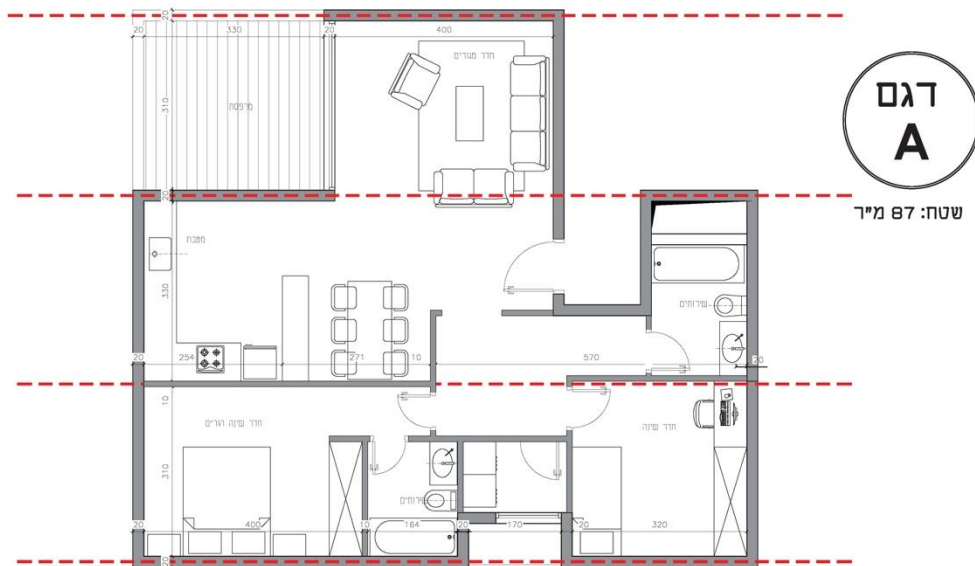
ציור 8.1.13: היחס בין המסד הבנוי בבנייה רגילה לחלק העליון הבנוי מיחידות מודולריות



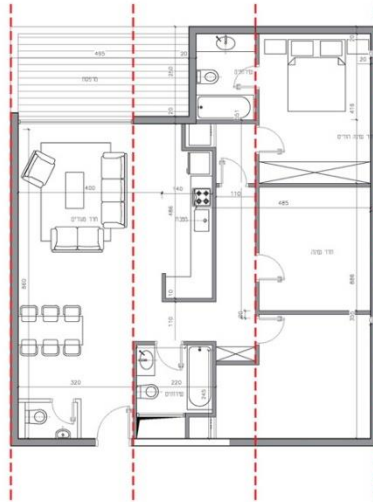
ציור 8.1.14: השתלבות יחידות המגורים עם הליבה



צור 8.1.15: שילוב של מספר דירות בבניין המבוסס על בנייה מודולרית



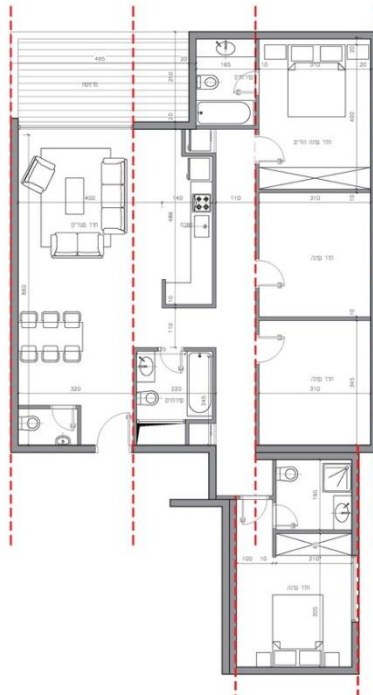
צור 8.1.16: דירת שלושה חדרים, המבוססת על שלוש יחידות מודולריות



דגם
D

שטח: 100 מ"ר

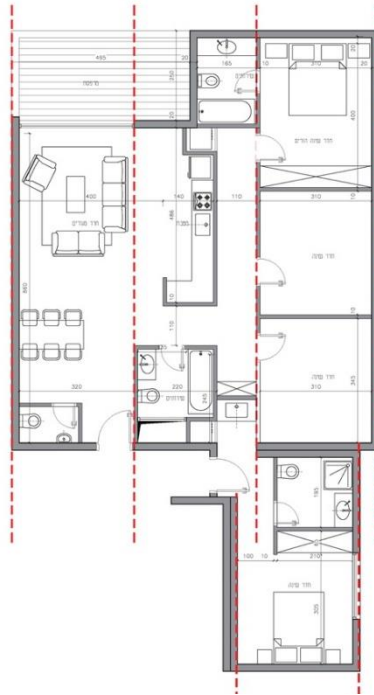
ציור 8.1.19: דגם D – דירת ארבעה חדרים, המבוססת על שלוש יחידות מודולריות



דגם
E

שטח: 122 מ"ר

ציור 8.1.20: דגם E – דירת חמישה חדרים, המבוססת על ארבע יחידות מודולריות



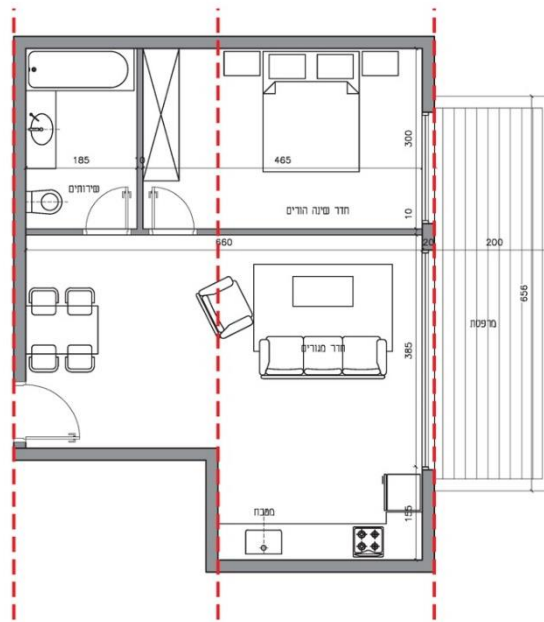
דגם
F

שטח: 100 מ"ר

דגם
G

שטח: 22 מ"ר

צויר 8.1.21: דגמים F ו G – שילוב של דירת ארבעה חדרים ודירת סטודיו, המבוססות על ארבע יחידות מודולריות



דגם
H

שטח: 55 מ"ר

צויר 8.1.22: דגם H – דירת שני חדרים, המבוססת על שתי יחידות מודולריות

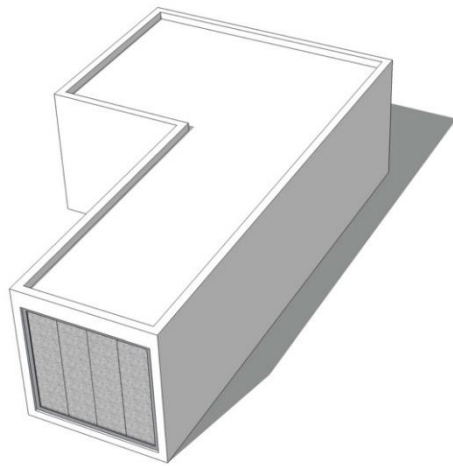
8.1.7 פיתוח מקרה מבחן של בניין מגורים/מלון/מעונות סטודנטים/בית אבות

מקרה המבחן כולל פיתוח אב טיפוס של בניין מגורים/מלון/מעונות סטודנטים/בית אבות, המבוסס על ליבה בבנייה קונבנציונלית ויחידות מגורים בבנייה מודולרית. הבניין כולל 100 יחידות מגורים בנות שני חדרים, המבוססות על שתי יחידות מודולריות. מבטים על הבניין נתונים בציר 8.1.23. ציור 8.1.23 מציג את התוכנית והחלוקה ליחידות של יחידת המגורים. הבניין מבוסס על מסד מבנייה רגילה, הכולל את כל חדרי השירות והחללים הציבוריים. היחידות המודולריות נשענות אחת על השנייה בחפיפה חלקית על מנת לאפשר שימוש בגג של יחידה כמרפסת של היחידה מעליה.

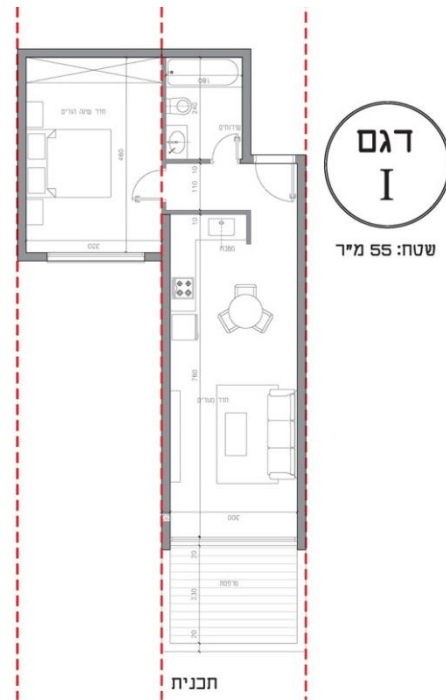




צור 8.1.23: מבטים על הבניין



פרספקטיבה
דגם דירה I



צור 8.1.24: תוכנית והחלוקה ליחידות מודולריות של יחידת המגורים

8.1.8 הקשר בין תכנון בעזרת BIM ובנייה מודולרית

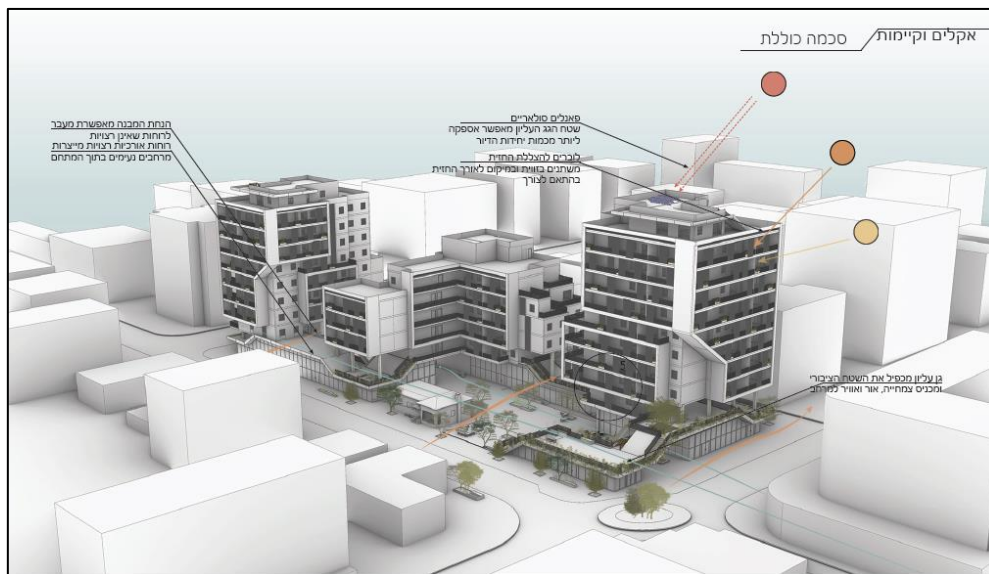
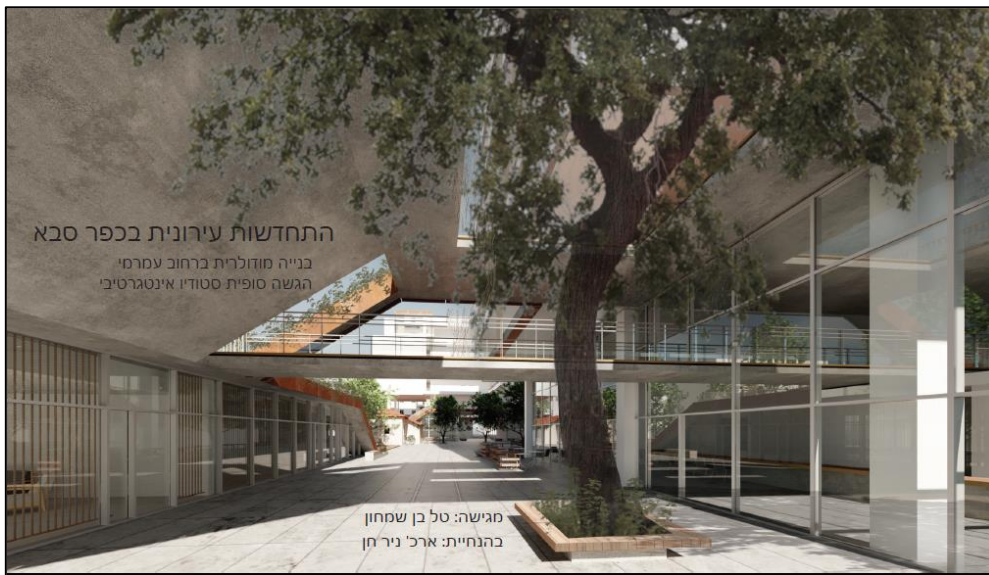
תכנון בשיטת Building Information Modeling (BIM) מבוסס על שימוש באובייקטים "חכמים". אובייקט "חכם" הוא אובייקט תלת ממדי הכולל מידע על מיקום, מידות, תכונות פיזיקליות, קשר לאובייקטים אחרים, מידע טקסטואלי על מחיר, תחזוקה וכד'. תכנון בעזרת אובייקטים שונה לחלוטין מהתכנון הקיים כיום בתוכנות קאד, המבוסס על שימוש באובייקטים בסיסיים כגון קו וקשת, הכוללים מידע בסיסי בלבד (קואורדינטות, צבע, עובי קו, שכבה). התכנון בשיטת BIM הוא תכנון תלת ממדי, אשר למעשה בונה את הבניין באופן וירטואלי לפני הבנייה המעשית. מבנה האובייקטים בתוכנות BIM מאפשר עבודה בתלת ממד באופן קבוע כך ששינוי באלמנט מסוים מתעדכן באופן סימולטני בכל הגיליונות בהם מופיע האלמנט. תכנון בשיטת BIM מאפשר לבצע סימולציות שונות על המודל, חישובי כמויות ועלויות מדויקים, לבדוק התנגשויות, ועוד.

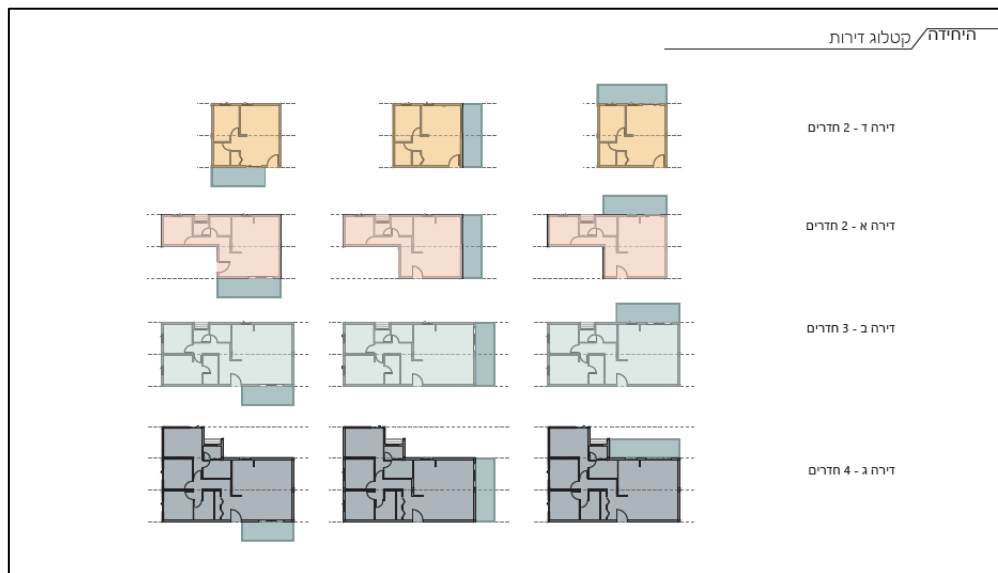
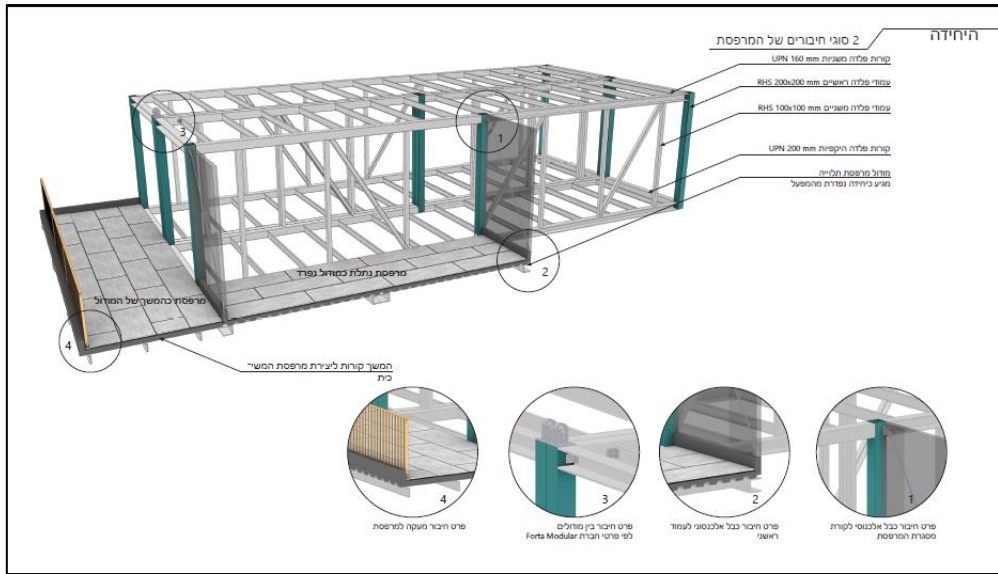
מעבר לתכונות אלו ואחרות, שגורמות לכך שענף הבנייה עובר לתכנון בעזרת תוכנות BIM, יש לבנייה המודולרית יתרון משמעותי בשימוש ב-BIM. בעולם ה-BIM, האלמנטים וה"משפחות" (יחידה הכוללת מספר אלמנטים בעלי קשרים פרמטריים ביניהם) נבנים לעיתים קרובות ע"י החברות, שמייצרות את היחידות המודולריות, וניתנים לשימושם של המתכננים. מכיון שהשימוש ב-BIM מבוסס על אלמנטים וניתן לאחד אלמנטים למה שמכונה משפחות פרמטריות, ניתן לייצר בקלות יחסית מודלים בסיסיים של כל היחידות בהן נעשה שימוש בבניין מסוים. יכולת זו עוזרת במידול מדויק של המבנה ומאפשרת לבצע שינויים והתאמות בקלות יחסית במודלים הבסיסיים ולגרום לעדכון אוטומטי של כל היחידות בבניין. יתרון זה דומה ליתרון בשימוש בתכנון קומה טיפוסית ב-BIM והכפלת התכנון לכל הקומות, אלא שבשימוש ביחידות מודולריות התכנון של היחידה נעשה ע"י החברה באופן שמתאים יותר לפס הייצור שלה, מדויק יותר מבחינת הערכת העלות ויכול לחסוך את הצורך בביצוע תוכניות ביצוע.

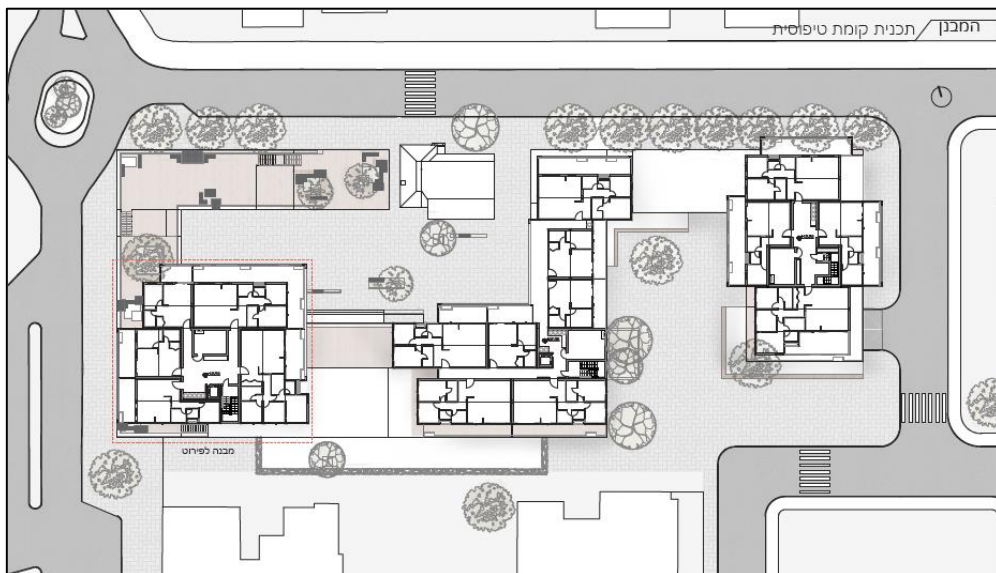
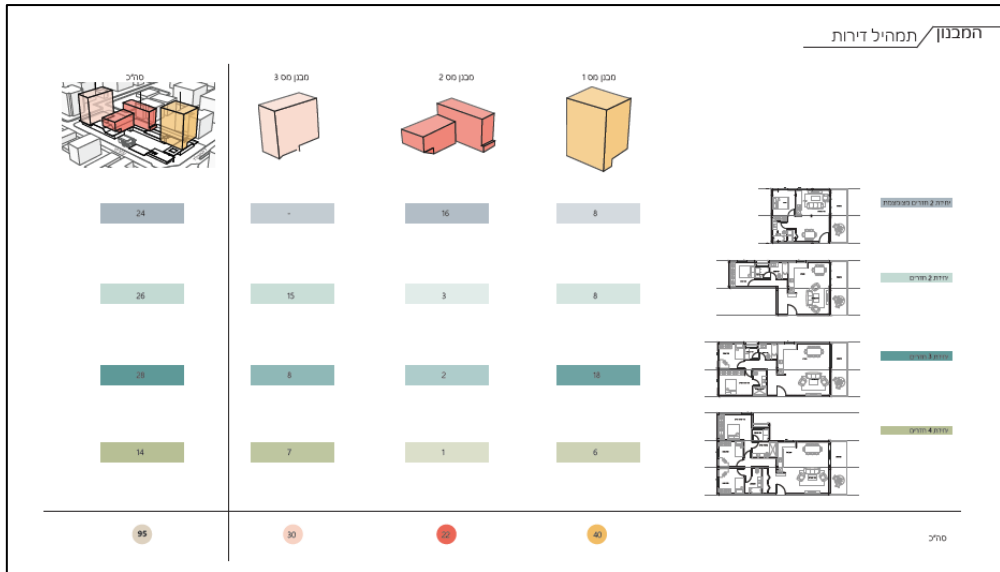
8.1.9 פרויקט (סטודנטים) סטודיו בבנייה מודולרית

חבר צוות המחקר, אדריכל ניר חן, הנחה בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים בטכניון בשנת הלימודים 2018-2019 פרויקט סטודיו שעסק בבנייה מודולרית. פרק זה מציג חלק מתוצרי הפרויקט באמצעות תמצית מהעבודות של שישה סטודנטים/סטודנטיות נבחרים. הפרויקט בחן את פוטנציאל השימוש ביחידות מודולריות תלת ממדיות לתכנון קומפלקס מגורים בכפר סבא. הסטודיו התמקד בבדיקת הפוטנציאל של טכנולוגיה זו לבניית קומפלקס מגורים עירוני בעל עירוב שימושים ותמהיל דירות מגוון. בנוסף ניסה הפרויקט למתוח באופן רעיוני את מגבלות הטכנולוגיה ולהראות אפשרויות לתכנון שאינו חזרתי היוצר מורכבות צורנית רבה תוך שימוש במספר קטן ככל האפשר של יחידות מודולריות חזרתיות.

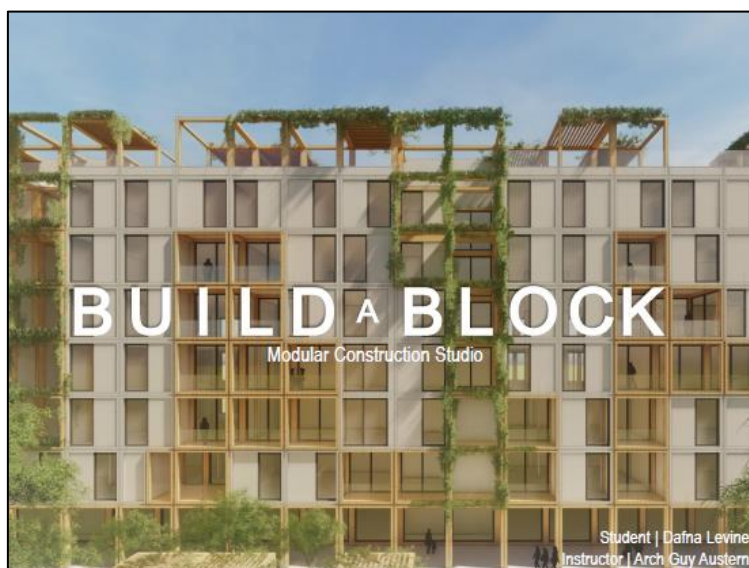
פרויקט של טל בן שמחון

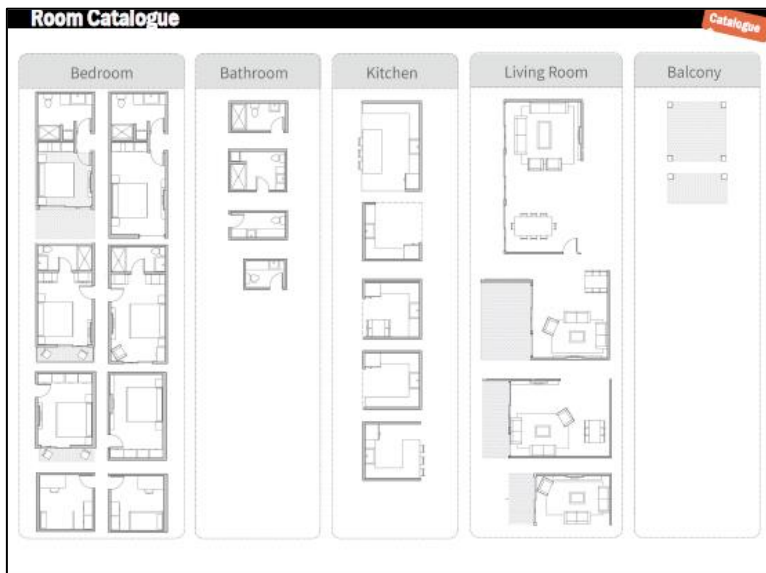
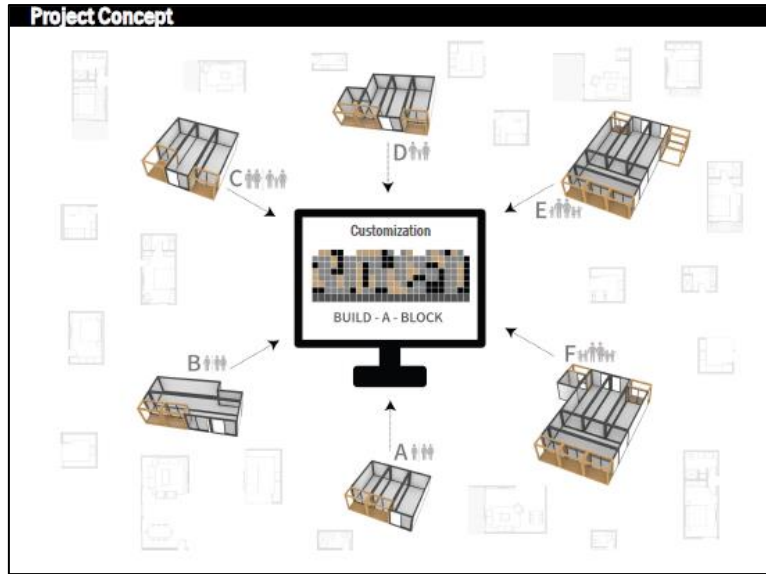


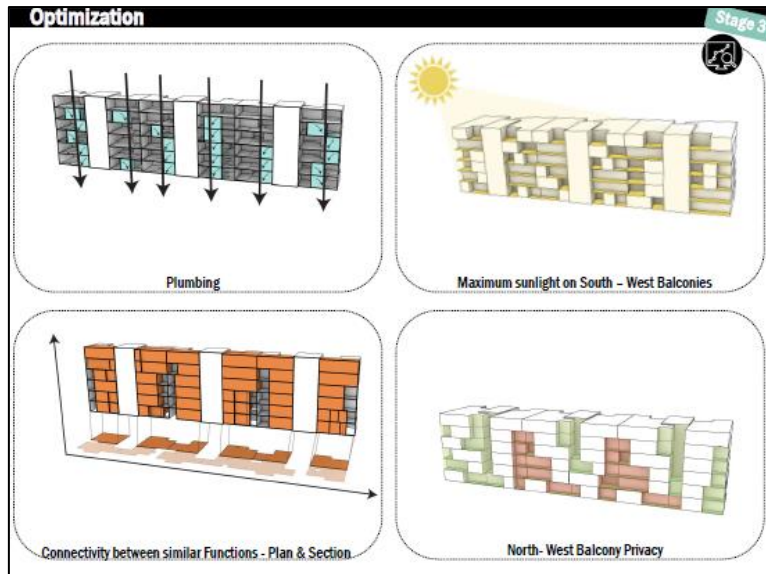




פרויקט של דפנה לוין



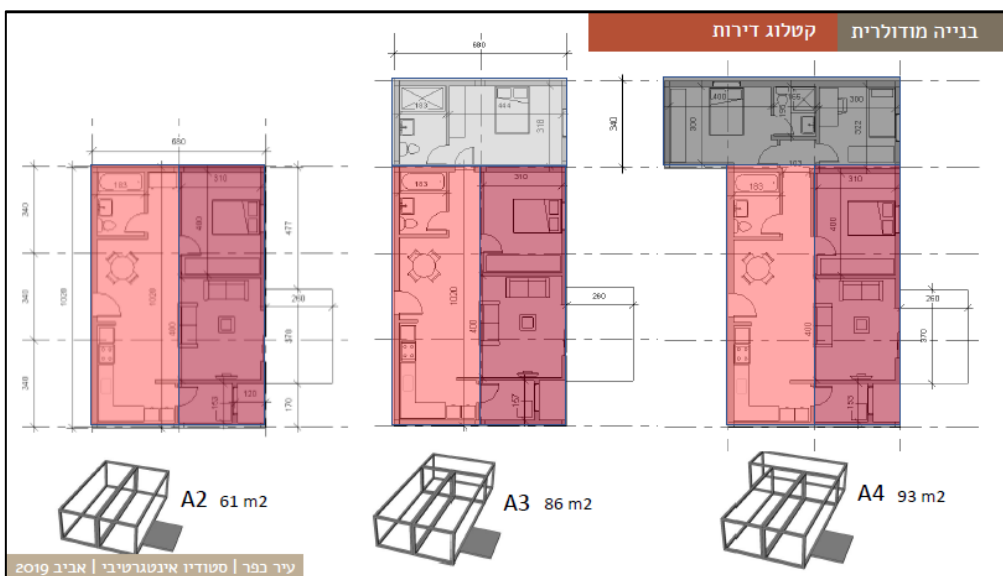
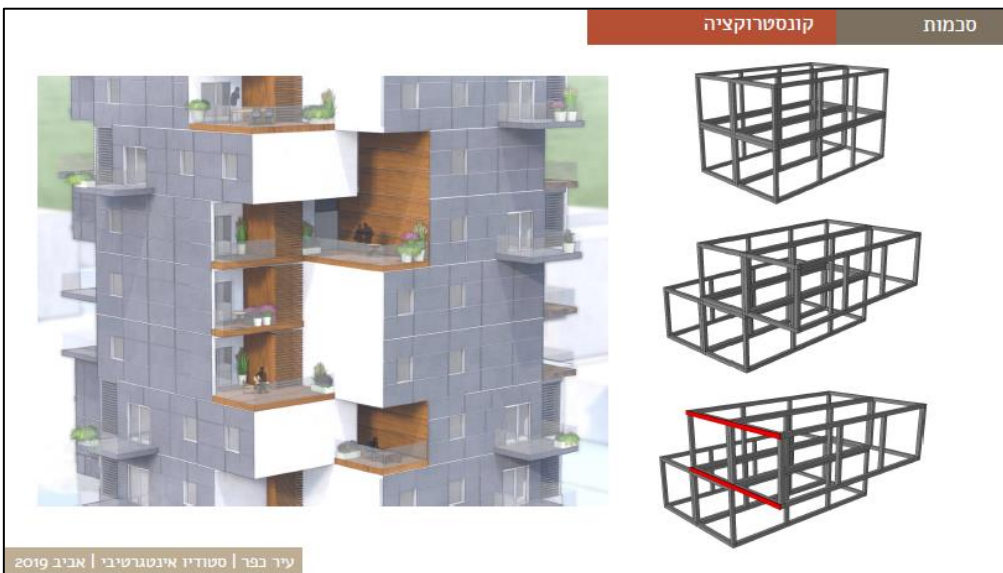






פרויקט של אביב שוורץ





בנייה מודולרית | **קטלוג דירות**

B2 53 m²
 B3 76 m²
 B4 80 m²

עיר נפר | סטודיו אינטגרטיבי | אביב 2019

בנייה מודולרית | **קטלוג דירות**

C2 62 m²
 C3 84 m²
 C4 92 m²

עיר נפר | סטודיו אינטגרטיבי | אביב 2019

בנייה מודולרית | **קלאק!**

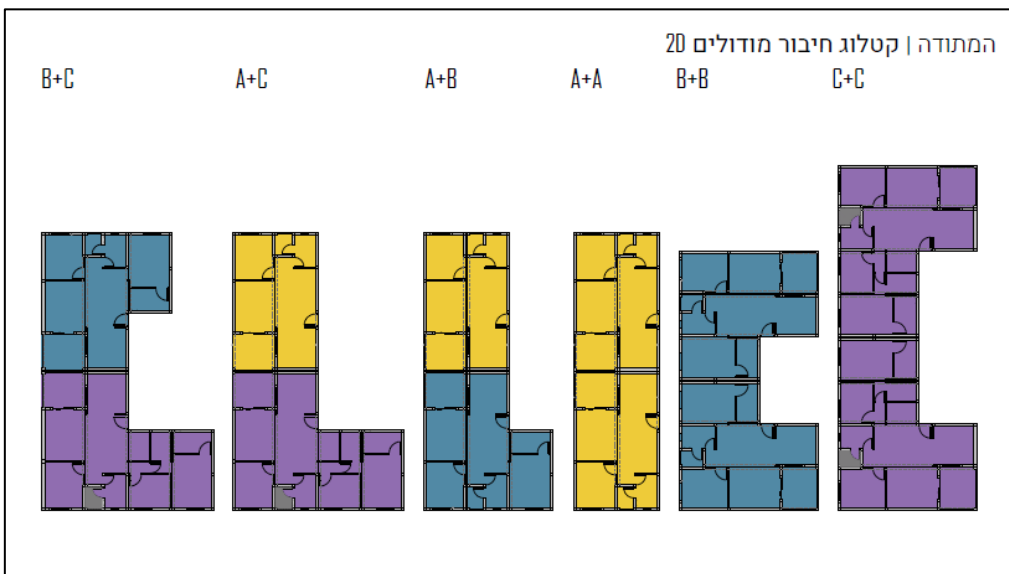
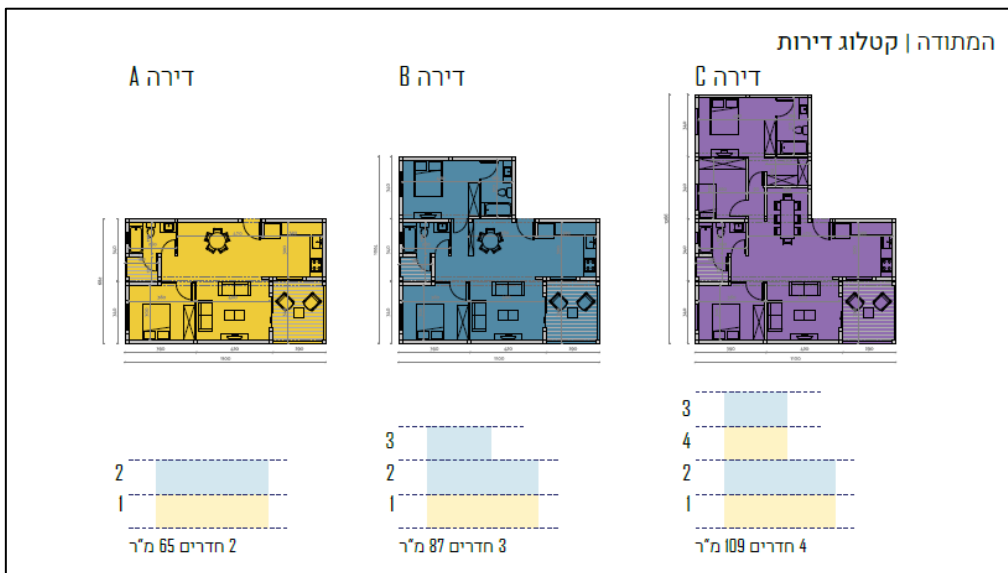
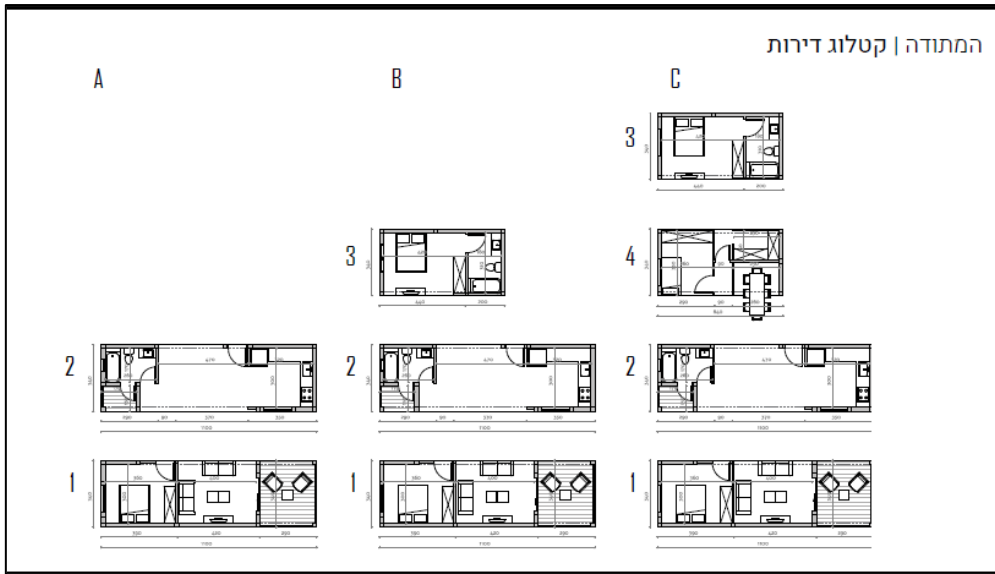
עיר נפר | סטודיו אינטגרטיבי | אביב 2019

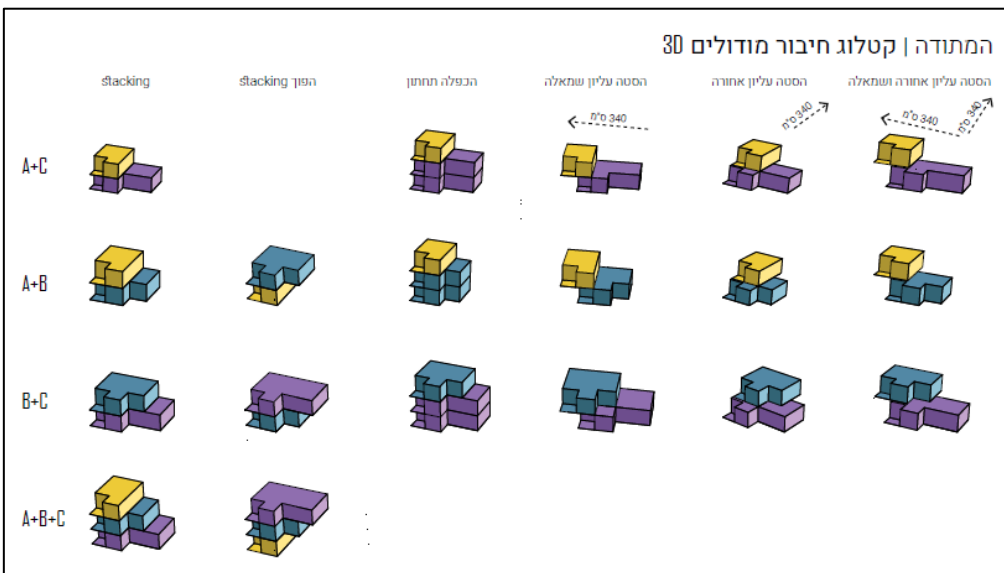
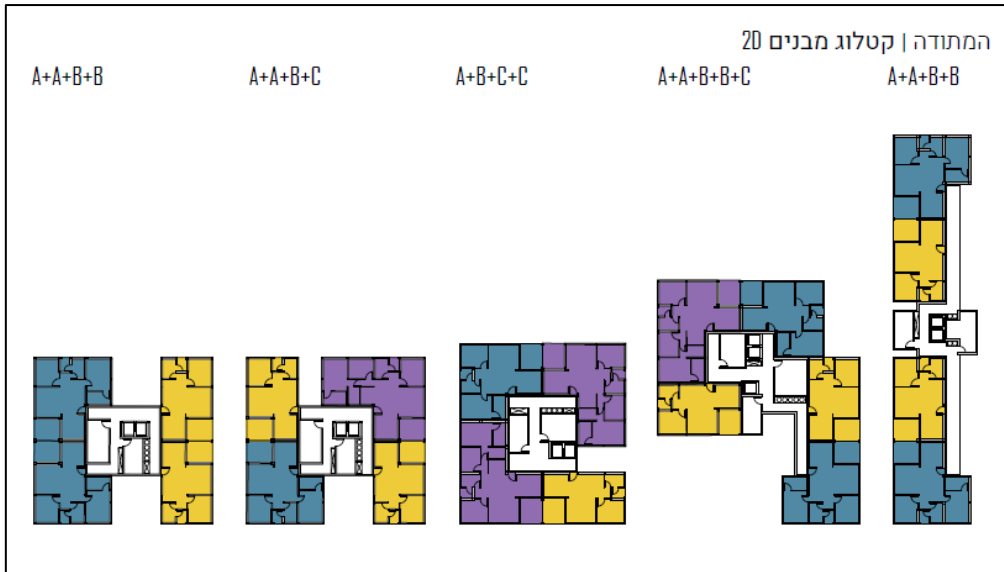


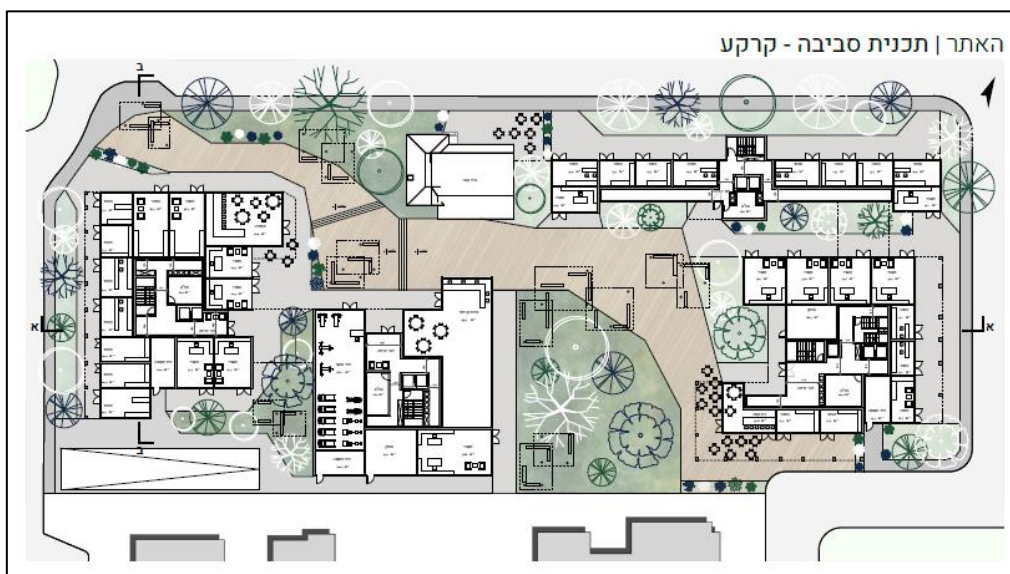
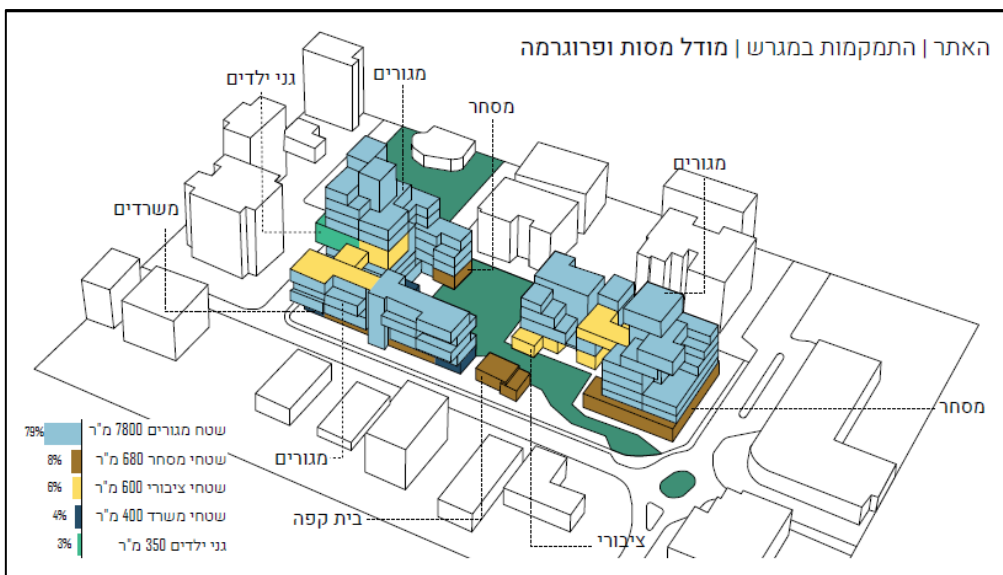


פרויקט של ספיר שלו









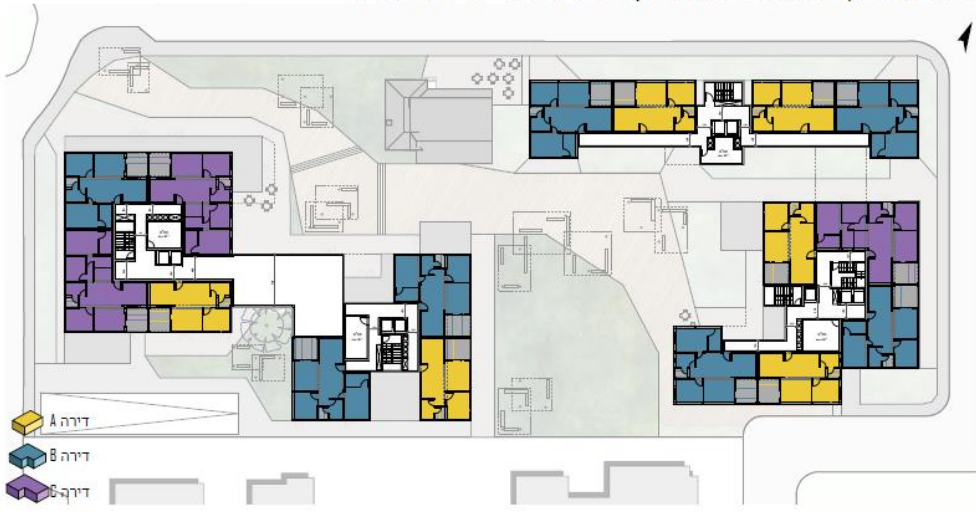
האתר | מבט אורבאני - כניסה למתחם



האתר | מבט אורבאני - כיכר עירונית




האתר | התמקמות במגרש | תכנית קומה טיפוסית - 75 יחידות דיור





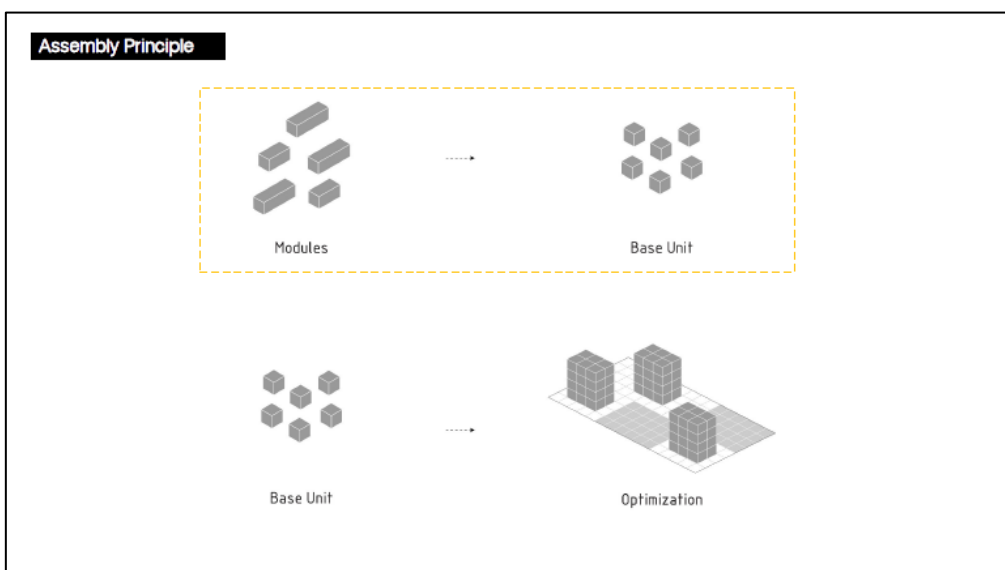
פרויקט של רונה שקד

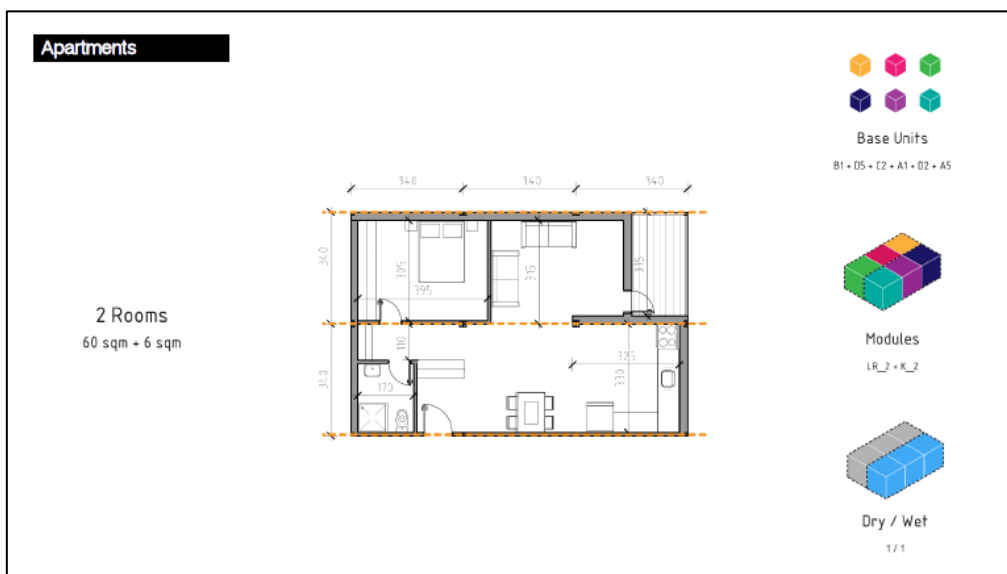
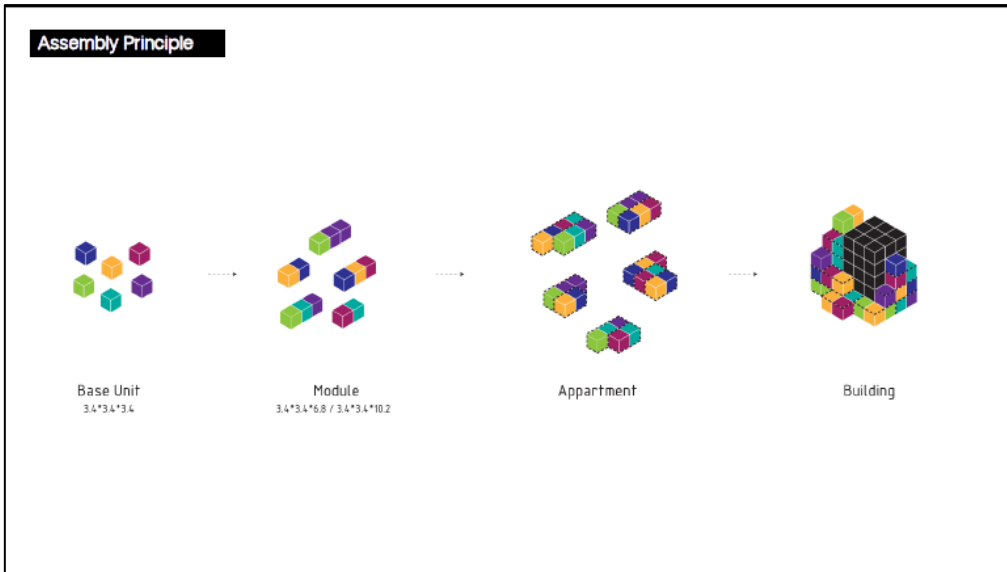


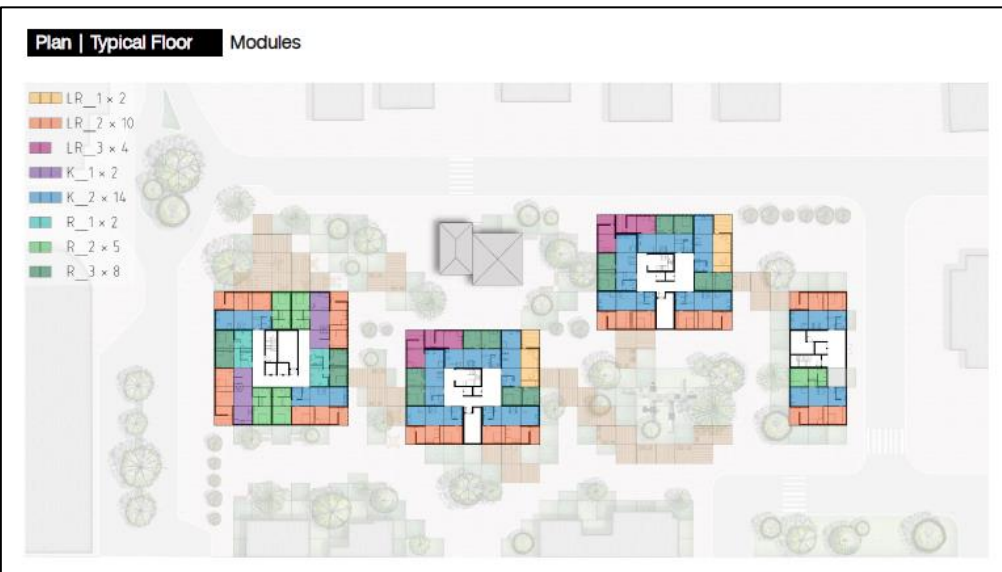
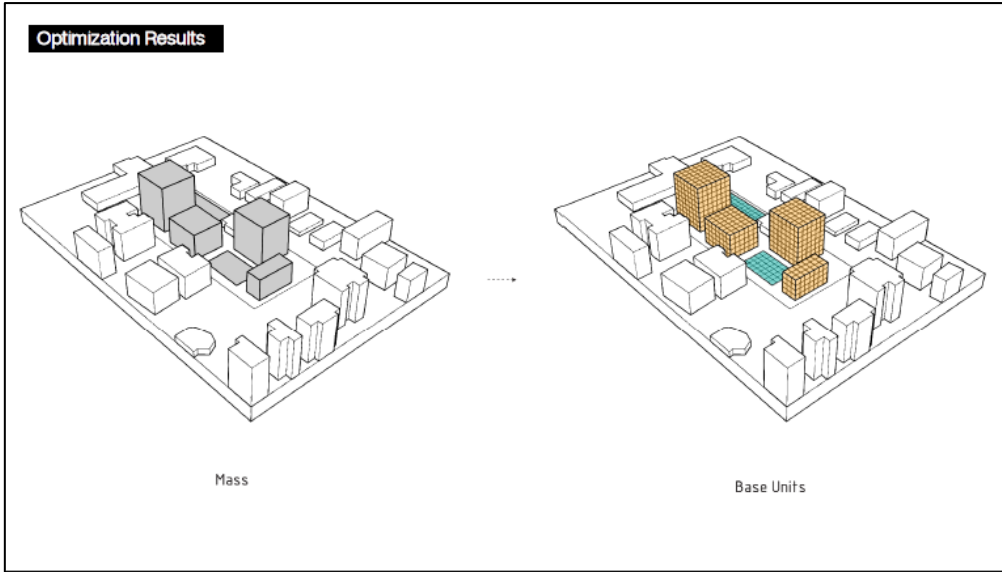
Module Generator

Parametric Modular Construction

Instructor | Arch Guy Austern
Student | Rona Shaked







8.2 היבטים הנדסיים

הדרישות התקניות והדרישות החלות על המוצר הסופי שהוא הבניין המוגמר אינן שונות בבנייה המודולרית מאלה החלות על הבנייה הקונבנציונלית. מכלול התקנים חל גם עליהן, ובעיקר הדרישות והקריטריונים התפקודיים שבהם. בחלק מהתקנים קיימים חלקים מרשמיים המבוססים על פרטי בניין שגורים בבנייה הקונבנציונלית ואלה לעיתים אינם יכולים לחול כפי שהם ודורשים התאמה לטכנולוגיה הספציפית. בנוסף, בגלל שני המאפיינים העיקריים של טכנולוגיית הבנייה המודולרית (כל יחידה מגיעה עם שלד שמהווה גם שלד של הבניין, וההכפלה של קירות ואלמנטי תקרה-רצפה), נוצרות נקודות תורפה מיוחדות (שאינן קיימות כלל בבנייה הקונבנציונלית) המחייבות פתרונות ייעודיים אותם יש ללמוד לעומק ולשלב בשלבי התכנון.

בתת-פרק זה כלולים היבטים של תכנון, תכנון, פרטי מבנה (קונסטרוקציה), ופרטי בניין במכלול הנושאים ההנדסיים (יציבות וחוזק הקונסטרוקציה, בטיחות אש, הגנה בפני רטיבות, בידוד תרמי ותפקוד אנרגטי, הפרדה אקוסטית, קיים). הפרק נועד לאנשי מקצוע מנוסים, המכירים את עקרונות התכנון והתכנון ההנדסיים ומיישמים אותם בבנייה הרגילה והמתועשת, ועוסק לכן רק בהדגשה של הנקודות המיוחדות הרלוונטיות ליישום עקרונות אלה בבנייה מודולרית, ובנקודות התורפה המיוחדות לטכנולוגיה זו.

8.2.1 יציבות וחוזק קונסטרוקציה

המושג "בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות" או בקיצור "בנייה מודולרית" מתייחס לטכנולוגיה של בנייה מחוץ לאתר, אשר בה הרצפה, הקירות והתקרה של היחידה המודולרית התלת ממדית מורכבים במפעל. יחידות אלו מובלות לאתר הבנייה ומחוברות אחת לשנייה אופקית ואנכית באמצעות עגורנים ליצירת בניין שלם תוך שבועות ספורים בלבד. בדרך כלל המודולים יוצאים מהמפעל בו הורכבו כאשר הם כבר כוללים בתוכם את כל עבודות הגמר בתוך היחידה וכל שנותר הוא לחבר את המערכות הקושרות בין כל יחידה לבין שכנתיה ולבצע את חיבורי השלד. יתרון השיטה הוא במהירות הבנייה, באיכותה ובהקטנת כמויות הפסולת הנוצרת בהשוואה לבנייה קונבנציונלית.

ניתן לאפיין את סוגי השלד של הבנייה המודולרית על פי החומר ממנו הוא עשוי:

- שלד מבטון מזוין
- שלד מעץ
- שלד מפלדה

מבין שלושת החומרים הנזכרים לעיל כאבני הבניין של השלד, הפלדה היא הנפוצה ביותר - במיוחד במבני קומות ואין לה תחליף כלל במבנים רבי קומות. שלדי הפלדה מתחלקים לשלושה סוגים:

- מודולים מפלדת מבנים רגילה (למבנים עד גובה של 60 קומות);

- מודולים מפלדה דקת דופן (למבנים עד לגובה של 10 קומות);
- מודולים ממכולות (למבנים עד לגובה של 5 קומות).

אפשר גם לסווג את סוגי השלד השונים המקובלים בבנייה המודולרית על פי הצורה בה מועברים הכוחות האנכיים והאופקיים מהמבנה אל הקרקע:

- מודולים בעלי ארבע חזיתות המעבירות את העומס באופן רציף. צורה זו תופיע בעיקר בשימוש במודולים מפלדה דקת דופן, שם חזית המודול עשויה מפרופילים אנכיים צפופים ("wall studs").
- מודולים בעלי ארבע חזיתות כמצוין לעיל אך עם פתחים בחזיתות. בד"כ בצידו הפתחים ימוקמו עמודים מפרופילים מפלדת קונסטרוקציה, המעבירים את העומס באופן מרוכז מעמוד אל העמוד שמתחתיו.
- מודולים עם חזיתות פתוחות בהם העומסים מועברים אך ורק דרך עמודים מפרופילי פלדת קונסטרוקציה, הממוקמים בפינותיהם. במקרה כזה גם הרכיבים האופקיים (קורות) יהיו מפרופילי פלדה קונסטרוקציה ולא מפרופילי דקי דופן.
- מודולים שאינם מעבירים עומס ואינם חלק מהשלד הנושא. כל שהם צריכים לשאת הוא את משקלם העצמי ואת ההטרחות להם הם חשופים בעת ההובלה וההנפה. במקרה כזה למבנה יהיה שלד נושא עצמאי.

מה שבעיקר מייחד את שלד המבנים המודולריים ממבנים רגילים הם המחברים המתחלקים גם הם לשלושה סוגים:

- א. מחברים לחיבור פנימי בתוך המודולים;
- ב. מחברים לחיבורים אנכיים ואופקיים בין מודולים למודולים שכנים;
- ג. מחברים לחיבור המודולים ליסודות.

המבנים המודולריים צריכים להיות מתוכננים לעמוד בעומסים ובהשפעות הבאים:

- א. עומסים בעת הובלה והנפה - בעת ההובלה המבנים נחשפים לתאוצות גבוהות. יש לתכנן את נקודת ההנפה שלהם ולוודא שבעת הנפתם הדפורמציות שהם עוברים מוגבלות בעיקר כדי למנוע סדיקה של אלמנטים רגישים שמורכבים בתוכם.
- ב. עומסים גרביטציוניים.
- ג. כוחות רוח - העומסים הדינמיים של הרוח מתאפיינים בתדרים נמוכים שנעים בין 0.01 ל-2.5 הרץ. מקובל לתכנן את המבנים כך שההסטה הקומתית האופקית לא תעלה על 1/500 והתזוזה האופקית הכוללת בראש המבנה לא תעלה על 1/600 ביחס לגובה המבנה. המבנים מתחילים להיות רגישים לאפקטים דינמיים של הרוח כאשר התמירות עולה על 1/5 וכאשר התדר העצמי שלהם נמוך מ-1 הרץ שמאפיין מבנים מודולריים בני 10 קומות (גובה של 30 מ') ויותר. נערכו מעט מאד מחקרים בתחום של התנהגות מבנים מודולריים לרוח. באותם מחקרים שנערכו נצפה

סוג המחברים (קשיחים, קשיחים למחצה או ללא מחברים כלל) כגורם משמעותי המשפיע על התנהגות המבנה.

ד. רעידות אדמה - מעט מאד מחקר נערך בתחום זה על מבנים מודולריים. המחקר המועט שנערך מתייחס בעיקר למבנים מודולריים (MSB) ממסגרות פלדה עם אלמנטי הקשחה (Braced Frames) בני 2-6 קומות. מבנים אלו מתאפיינים בכך שהמוד הראשון של התנודה הוא הדומיננטי שבהם והנזק (התפתחות פרקים פלסטיים) מתרחש בעמודים בקומה הראשונה שלהם. המבנים מתאפיינים בחוסר המשיכות של המחברים לחיבור אנכי בין המודולים וכתוצאה מכך בחוסר יכולת של המבנה לבצע רדיסטריבוציה של העומסים לאחר שרכיבי ההקשחה מגיעים לכניעה.

ה. עומסי הדף - פגיעה מפיצוץ קרוב יכולה לגרום לכשל מקומי של רכיבים וכתוצאה מכך להתמוטטות בשרשרת. מבחינת ההתנהגות הגלובלית של המבנה לעומסי הדף, קיימים מבנים מודולריים ייעודיים אשר קירותיהם עשויים מכריך מלוחות פלדה. עובי פחי הפלדה נע בין 3.2 ל-7.9 מ"מ והם מרותכים לשלד הפלדה הנושאת.

ו. כשל בשרשרת - ההתמודדות עם כשל בשרשרת נעשית על ידי הגדלת משיכות המבנה ועל ידי תכנון נתיבים חלופיים למעבר עומסים.

ז. בטיחות ועמידות באש – ראה סעיף 8.2.2 להלן.

במצב גבולי של שרות המבנים המודולריים צריכים, בנוסף לדרישות ממבנים רגילים, לקיים תנאים נוספים הנובעים מהרכבת הרכיבים הפנימיים הרגישים לדפורמציה עוד בטרם ההובלה. בדרך כלל יהיו המבנים המודולריים גם רגישים יותר לתנודות בשל אופי המחברים (קשיח למחצה) שבין היחידות המודולריות.

תשומת לב מיוחדת צריכה להינתן לתנודות אנכיות של רצפות היחידות המודולריות. במיוחד הדברים אמורים לגבי הבנייה בישראל. בתחום המגורים, רובה ככולה של הבנייה כוללת תקרות מבטון מזוין אשר במפתחים המקובלים בבנייה למגורים התדר העצמי שלהן למודים של תנודה אנכית הוא גבוה ונדירים המצבים בהם הן גורמות אי נוחות פיזיולוגית למשתמש. במבנים המודולריים, בהם הקונסטרוקציה הנושאת של הרצפות היא מפלדה – גם אם לעיתים על גבי הפלדה נוצקת שכבה דקה של בטון – התדרים העצמיים לתנודה אנכית נמוכים משמעותית ועלולה להיגרם אי נוחות פיזיולוגית. בעולם המערבי בו נפוצה יותר בנייה בפלדה ובעץ, המשתמשים מראש מורגלים יותר בשימוש ברצפות גמישות יחסית אך לא כך בישראל.

התכן הסייסמי של המבנים המודולריים מורכב יותר ולא מכוסה באופן מלא בתקינה בשל האופי הלא משיך של חיבורי הברגים המחברים מודול למודול.

ניתן במבנים רבי קומות לשלב בנייה קונבנציונלית עם בנייה מודולרית. ניתן לבנות למשל גרעינים נושאים לכווחות אופקיים המוקמים בשיטות קונבנציונליות ולצידם מוקמות היחידות המודולריות.

בסוג כזה של בנייה קיימות מספר שיטות עיקריות המתועדות בספרות המקצועית להתמודד עם רעידת

אדמה ולספוג את האנרגיה במבנים מודולריים, בעת רעידת אדמה.

השיטה הראשונה מבוססת על קשיחות יחסית גבוהה בין יחידה מודולרית ליחידה שמעליה (או מתחתיה) וחיבור גמיש יחסית בין היחידות לבין הגרעינים הקונבנציונליים.

השיטה השנייה מבוססת על חיבור רק של היחידה המודולרית בראש המבנה המודולרי והיחידה המודולרית בתחתית המבנה המודולרי אל הגרעינים הקונבנציונליים. שאר היחידות המודולריות מחוברות בינן לבין עצמן אך לא מחוברות לגרעינים הקונבנציונליים.

שיטה זו דומה מבחינה עקרונית לעקרון הריסון באמצעות מסה עם תדר מכוון (TMD – Tuned Mass Damper) אולם יחס המסות בין המבנה המודולרי לגרעינים הקונבנציונליים הוא הרבה יותר משמעותי מאשר יחס המסות המקובל בשיטת TMD הקונבנציונלית. בנוסף קיימים מרסנים בין כל מודול למודול שמעליו ומתחתיו.

קיים גם ניסיון בעולם (בעיקר בסין) להקמת מבנים רבי קומות מיחידות מודולריות נפחיות בלבד ללא גרעינים קונבנציונליים. במבנים אלה תפקוד המחברים והמידול האנליטי שלהם הם הנושאים הקריטיים לתכן המבני. מניסויים רבים שנעשו נצפה פעמים רבות כשל באזור המחבר ולא מחוץ לא. תוצאות אלו מעידות על החשיבות הרבה של תכן להתמוטטות בשרשרת כיון שכשל באזור המחבר עלול לגרום לאובדן יציבות לצומת כולו.

ההתנהגות של המחברים, שמהווים את עקב אכילס של הבנייה המודולרית, פוגעת גם ביכולת ספיגת האנרגיה של המבנה בעת פעולת עומסים חריגים כמו בעת רעידת אדמה, ולפיכך יש להימנע משימוש במקדמי הקטנת כוח המקובלים בתכן של מבני פלדה קונבנציונליים.

פותרו בעולם כבר מספר סוגים של מחברים. לגבי חלק מהם בוצעו ניסויים של בדיקת קשיחות (מומנט-סיבוב) ומשיכות. ניסוי מסוג זה מומלץ לפני כל תכן של מבנה עם מחברים מסוג חדש מכיוון שלא ניתן להעריך את הקשיחות והמשיכות של המחבר באופן אנליטי בשל מורכבותו.

האנליזה של מבנים המורכבים מיחידות מודולריות נעשית בדרך דומה לאנליזה של מבנים רגילים – אולם יש להביא בחשבון בצורה נכונה את התנהגות המחברים. יש להשתמש בשיטות מידול אנליטיות שמצד אחד הן מפושטות (כך שיוכל לשמש באופן יעיל מהנדסים בפרקטיקה) בכל הנוגע למידול המחברים ומצד שני הן מתחשבות בדיוק מתקבל על הדעת בהשפעת אותם מחברים על ההתנהגות המבנית.

בחישובי קריסה של עמודי מבנה מודולרי אין להשתמש בביטויים הרגילים הנמצאים בתקינה של מבני פלדה. גם הנחת יסוד (שמרנית לכאורה) שניתן להתחשב בחיבורים שבין המודולים כחיבורים פרקיים עלולה להביא להערכת יתר מוטעית של התסבולת לכוחות ציריים של עמודי המבנה המודולרי. קיימות עבודות מחקריות בהן הותאם ה"כלל הצרפתי" לחישוב K factor המקובל בתקן האירופי אל פתרונות נומריים מורכבים שהתקבלו ע"י החוקרים. התאמה הזו מייצרת ביטוי פשוט, שנותן פתרון שמרני ביחס

לפתרון הנומרי המלא, בטעות שאינה עולה על 6% במקרה הקיצוני ביותר ובדרך כלל אינה עולה על 1.5%.

8.2.2 בטיחות אש

היבטים של בטיחות אש כוללים מספר נושאים, שכל אחד מהם מטופל בתהליך התכנון והביצוע ע"י גורם מקצועי אחר ולעיתים ע"י יותר מגורם מקצועי אחד (אדריכל, מהנדס, יועץ בטיחות, וכד'). ההיבטים השונים ונקודות התורפה העיקריות, המחייבות תשומת לב מיוחדת בשלבי התכנון והביצוע של בנייה מודולרית, כוללים:

א. מילוט בטוח: הצורך במילוט בטוח מן הבניין במקרה של שריפה מכתוב אילוצי מידות מינימום/מקסימום בתכנון. ההשפעה היא בעיקר על רוחב וגובה פתח של דלתות ומעברים, רוחב מהלכי מדרגות ופרוזדורים, ועל אורך גישה למוצא בטוח ("מרחקי הליכה"). הדרישות בהקשר זה עבור סוגי בניינים שונים (לפי ייעוד - מגורים, משרדים, וכד', ולפי גובה הבניין - נמוך, גבוה, רב-קומות וכד') נקובות בישראל בתקנות תכנון הבניין. דרישות אלה מחייבות באופן בלתי תלוי בטכנולוגיה ממנה מבוצע הבניין, ולכן גם בבנייה מודולרית חייבים ליישמן במלואן. הנקודות העיקריות לתשומת לב בהקשר זה הן:

(1) כל המידות הנדרשות בתקנות הן מידות נטו, שנמדדות מפני גימור סופי לגימור סופי. באופן מיוחד נוגע הדבר לרוחב פתחים בין יחידות ובין לבין הגרעין המרכזי של הבניין. בפתחים אלה מיישמים באתר את רכיבי ההסתרה הסופיים של המשקוף, ומידת הפתח הקובעת לקיום הדרישה היא המידה נטו לאחר התקנת רכיבים אלה.

(2) השאיפה להקטין את מספר היחידות התלת ממדיות המורכבות באתר ולבסס את התכנון על יחידות גדולות ככל האפשר, משפיעה על התכנון האדריכלי של הקומה. לכך יכולה להיות השפעה גם על התוכניות האדריכליות של הדירות בקומה, ולהוביל באופן כללי לתוכניות חדשניות שאינן שגרתיות. שינויים קונספטואליים בתכנון שנובעים מאילוצים טכנולוגיים יכולים להוות גורם מפרה ויצירתי ולהוביל לחדשנות מחשבתית ואסתטית. יחד עם זאת טמון בהם סיכון שנובע מהעדר אינטואיציה מלאה לפרטי הפרטים של הסיטואציה החדשה, ובעיקר לשינויים במידות של אורך הגישה למוצא בטוח ומרחקי הליכה.

ב. גילוי, כיבוי ושליטה בעשן: אין שום קושי לקיים בבנייה המודולרית את הדרישות על ההתקנה והמיקום של מערכות גלאי עשן, מערכות כיבוי (כולל מערכות כיבוי אוטומטיות ומתזים) ומערכות שליטה בעשן, כנקוב בתקנות תכנון הבניין ובתקנים הנלווים. תכנון המערכות חייב להיות גמור לפני תחילת ייצור היחידות במפעל היות שיחידות הקצה שבתוך היחידה מותקנות במפעל, כולל הצנרת והחיווט שעוברים בתחום היחידה ומותקנים בתוך תקרת היחידה. את החיבורים אל המערכת

המשותפת יש גם כן לתכנן מראש, כולל כל האביזרים, ובתכנון תהליך הביצוע לאפשר אליהם גישה מתאימה ובטוחה לביצוע העבודות בעת ההרכבה והגימור באתר (ראו גם תת-פרק 8.3).

ג. מניעת התפשטות אש: אחד הכללים הבסיסיים בתכנון בטיחות האש של הבניין הוא תיחום האש ומניעת התפשטותה בבניין באורח בלתי מבוקר. תכנון נכון מאפשר לצמצם את התפשטותה במדור האש בו היא פרצה, ולמנוע את התפשטותה מהמדור הזה אל מדורים אחרים. הגורמים המבוקרים בהקשר זה ע"י התקנות והתקנים הנלווים מפורטים להלן, כאשר לכל אחד מהם מובהרות נקודות הציון המיוחדות בבנייה המודולרית:

סיווג אש של חומרי הבנייה – הדרישות מפורטות בתקן הישראלי ת"י 921 שהינו תקן מחייב על פי תקנות התכן. חומרי הגמר בבנייה המודולרית זהים לאלה המשמשים בבנייה הרגילה ולכן אין קושי לעמוד בדרישות סיווג האש החלות עליהם. יחד עם זאת יש לקחת בחשבון שבשלב זה התקן נמצא בשלבי מעבר והשלמה מגרסה קודמת (שכללה דרישות ברורות ומפורטות לגבי כל חלקי המבנה ושכבות האלמנטים השונים) לגרסה חדשה שאינה כוללת עדיין דרישות לגבי חלק ניכר של החומרים והאלמנטים האחרים, ובעיקר אינה כוללת עדיין דרישות לגבי חומרי השלד. מודגש כאן לפיכך, שעל פי הגרסה הקודמת של התקן שלד המבנה בבנייה שאינה נמוכה חייב להיות מחומרים המסווגים כ"בלתי דליקים". בהתאם לכך, כל עוד לא נקבעו דרישות אחרות בתקן החדש והמסמך התומך היחיד בהקשר זה הוא גרסת התקן הקודמת, יחידות תלת ממדיות עם שלד מעץ אינן מתאימות לבנייה מודולרית עם יחידות נושאות בבנייה שאינה נמוכה.

מניעת רציפות של חומרים דליקים – חומרים דליקים העוברים ברציפות עלולים להוביל את האש לגובה ולאורך החומר הרציף. ביחידה המודולרית, כאשר חומרים דליקים שאינם בפני השטח (כגון חומרי בידוד תרמי ואקוסטי) כלואים בין שכבות מחומרים בלתי דליקים המכסות עליהם מבפנים (למשל לוחות גבס) ומבחוץ (למשל לוחות צמנט או רצפת בטון קל על סיפון פלדה), החומרים הדליקים ביחידה אחת יהיו מופרדים לחלוטין מאלה שביחידות הסמוכות, ולא ייווצר מצב של חומר דליק העובר ברציפות לגובה ולרוחב הבניין. במצב כזה, ההגבלות החלות על דרגת הדליקות והתפשטות האש של החומרים הכלואים יכולות להיות פחות חמורות. לעומת זאת, כאשר שכבת בידוד מחומר דליק אינה מוגנת בצידה החיצון של היחידה על ידי חומר רציף בלתי דליק הסוגר עליה מכל הכיוונים, או שלוחות ההגנה על הבידוד שבצד החיצון של היחידה עשויים בעצמם מחומר דליק (כגון לבידים), מתקבלות שתי שכבות מחומרים דליקים זו מזו ונוצרת רציפות של חומר דליק כפול הן לגובה הבניין והן לרוחבו. בשל הסיכון הרב להתפשטות אש שמצב זה גורם, יש להחמיר ולהגביל במקרה כזה את דרגות הדליקות והתפשטות האש של השכבה שגורמת לרציפות החומר הדליק.

כאשר החזית של היחידות אינה החזית הסופית בבניין ומבוצעות השלמות באתר, הכוללות בדרך כלל תוספת איטום, בידוד ושכבת גמר תלויה ביבש, שכבת הבידוד עלולה להיחשף לאש שתתפשט

מפתחי חלונות ותחדור בין שכבת הגמר לבניה (על אף אמצעי ההגנה של חסימת אש חלקית המצוינות להלן), ולכן חלות עליה דרישות סיווג אש חמורות במיוחד.

חסימת אש במעברים רציפים – הסיכון להתפשטות אש קיים בכל מסלול רציף בו יכול לזרום אוויר. בבנייה המודולרית קיימים חללי אוויר סמויים בכל המפגשים שבין היחידות. ללא חסימת אש מתאימה חללים סמויים אלה עוברים למעשה ברציפות לגובה, לרוחב ולאורך כל הבניין. מסלול אוויר רצוף בין פנים היחידות לבין החללים הסמויים הללו יכול להיווצר במקרה של שריפה כאשר המשקוף שסביב פתחי דלתות ומעברים, הנמצאים בקירות שבין יחידות סמוכות, מתנתק או בוער בעצמו. היות שמערכת המשקוף עשויה בדרך כלל מחומרים דליקים ואינה אטומה לאש, יש הכרח לבצע חסימת אש סביב פתחי דלתות ומעברים בקירות כפולים בין שתי יחידות צמודות. חסימה זו מתאפשרת ע"י התקנה של צמר סלעים צפוף הדחוס היטב במרווח שסביב כל היקף הפתח, כולל בסף התחתון. קו הגנה נוסף הוא חסימות אש אופקיות בראשי כל המרווחים שבין היחידות (במפלס התקרה), אשר מבטיח מניעת התפשטות האש לגובה החללים הסמויים במקרה שהמחסום סביב פתח כלשהו נפרץ, וחסימות אש אנכיות רצופות עם האופקיות בקצות היחידות. ההתקנה של חומרי החסימה האנכיים צריכה להתבצע על יחידה מותקנת לפני התקנה היחידה הבאה הצמודה אליה, כך שהמחסום יידחס היטב. ביצוע חסימת האש בראשי היחידות יכול להתבצע כאשר כל היחידות של הקומה מורכבות במקומן, ולפני ההתקנה של מערכות איטום נוספת או הנחה של יחידות הקומה מעל. יש להקפיד שחומרי חסימת האש מוחדרים לעומק המרווחים וממלאים היטב ובדחיסות את כל המרווח, ללא אפשרות של פריצת אש דרך חרכים בין חומר החסימה לבין פני המעטפת החיצונית של היחידה.

כאשר היחידות אינן כוללות את הגימור הסופי של החזיתות ואלה מותקנות באתר הבנייה כחזיתות תלויות קיים תמיד מרווח אוויר בינן לבין הצד החיצון של היחידה. מרווח זה עובר ברציפות לגובה ולאורך החזית, וגם בו נדרשות חסימות אש סביב כל פתחי החלונות, חסימות אש רציפות לאורך החזית המפלסי התקרות, וחסימות אש אנכיות בתוך המרווח שבקצה קירות הפרדה בין דירות, קירות הפרדה בין דירה לחלל ציבורי וכד'. גורם נוסף שעלול להוות מסלול חבוי להובלת אש אל החללים הסמויים שבין היחידות הם מעברי צנרת וחיווט. מסיבה זו יש להגן על כל מעבר צנרת, המצוי בין היחידה אל יחידה אחרת או אל הגרעין, ולעטוף אותו היטב בכל היקפו החיצון ע"י מחסום אש יציב, המפריד את הצינור מהחלל הסמוי ומבטיח שבמקרה של אש הצינור לא יגרום לחדירת אש אל תוך החלל הסמוי שבין היחידות.

עמידות אש של קירות ותקרות – בתכנון בטיחות האש של בניין לוקחים בחשבון שבתוך מדור האש (למשל דירה בבניין מגורים) אין אפשרות לחסום את התפשטות האש מחדר לחדר, אך ההפרדה בין המדורים חייבת להיות מובטחת. בהתאם לכך, תקנות התכנון מציבות דרישות עמידות אש לפי אמות המידה של הפרדת אש (כושר בידוד, ושלימות) על כל האלמנטים המפרידים בין

דירות ובינן לבין חללים ציבוריים בבניין, אך לא קובעות שום דרישה ממחיצות בתוך הדירה. דרישות עמידות האש תלויות בגובה הבניין ובתפקידו של אלמנט הפרדה.

קירות ותקרות בבנייה המודולרית עשויים במרבית המקרים מלוחות דקים על שלד של זקיפים וקורות עם חומרי בידוד תרמי ו/או אקוסטי בין הלוחות. הלוחות הדקים נסדקים או מתכלים במהלך השריפה. אם זה קורה לפני שהאש דעכה חומרי הבידוד, נחשפים לאש וגם כן מתכלים, תוך פרק זמן הנובע מדרגת הדליקות של החומר. אם האש קיימת עדיין ביחידה היא יכולה להמשיך ולכלות את שכבות הקיר החיצוניות של קיר היחידה ולאחר מכן את שכבות הקיר של היחידה הסמוכה מבחוץ פנימה, וכך לעבור ולהתפשט מיחידה אחת לאחרת. בהנחה שחסימת אש סביב כל הפתחים מבוצעת כנדרש, היא חוסמת ומונעת את התפשטות האש לתוך המרווח כל עוד רכיבי הקירות והתקרה לא אפשרו פריצת אש דרכם. אמצעי זהירות נוסף לפריצה מוקדמת של האש אל המרווחים היא מחסומי האש הנדרשים בהיקפי המפגשים בין היחידות. בזכות מערכת חסימות האש, רק אחרי ששכבות הקיר של יחידה אחת נפרצות האש מאתגרת את הקיר של היחידה הסמוכה, וכל עוד הוא לא נפרץ – האש לא תתפשט לתוך המדור הסמוך.

דרישות עמידות האש משיקולי הפרדה (כולל אמות המידה לכושר בידוד, ולשלימות) חלות לפיכך על מכלולי הקירות הכפולים שבין דירות, המכלול של הקיר הכפול בין דירה לבין חללים ציבוריים, והמכלול תקרה/רצפה בין דירות.

ד. מניעת כשל מבני – כשל מבני עלול להתרחש בזמן שריפה עקב האצה של דפורמציות עד לקריסה, או היווצרות פרקים פלסטיים יתירים עקב החלשות חומרי השלד בשל התחממות לטמפרטורה גבוהה מדי. הגורם התכנוני באמצעותו מבקרים את ההתנהגות של שלד המבנה במקרה של שריפה הוא עמידות האש של השלד על פי אמת המידה ליציבות וחוזק. תקנות התכן כוללות דרישות לעמידות אש של מרכיבי השלד, אשר נקבעות כתלות בגובה הבניין. החומרים הדורשים הגנה הם פלדת הזיון בבנייה מבטון ורכיבי הפלדה והפח המעוצב בקר בבנייה מפלדה. בבנייה עם יחידות מבטון, התכן מבוצע לפי התקן הישראלי ת"י 466 ולפיו עובי הכיסוי על פלדת הזיון הוא הגורם הקובע את עמידות האש המושגת, כמפורט בתקן.

כשהיחידות מבוצעות בבנייה קלה מקירות נושאים מפרופילים מעוצבים בקר, מהסוג של LWSF, עמידות האש מושגת בדרך כלל באמצעות הגנת שטח, המבוססת על לוחות החיפוי של הקירות. אלה מגנים על זקיפי הקירות מהאש המגיעה מהחלל הדיורי. עובי הלוחות ומספרם נקבע על פי דרישות עמידות האש כתלות בחומר המשמש לביצוע הלוחות. יש לזכור שעמידות האש מבחינה זו אינה זהה לזו המתקבלת משיקולי הפרדת אש. עמידות אש לפי אמות המידה להפרדה מתקבלת מכל השכבות של הקיר (ובבנייה המודולרית, כאמור לעיל, מהקיר הכפול) כאשר הקריטריון הראשי הוא טמפרטורה ממוצעת שאינה עולה על 140°C בצד האחורי של הקיר (בפני הקיר הפנימיים ביחידה הסמוכה). לעומת זאת, ההגנה על הזקיפים מתקבלת מהלוחות הפנימיים

בלבד (אלה המחפים את הזקיפים הנושאים שבקיר היחידה בצד הפנימי בלבד וכך מפרידים בינם לבין האש שפרצה ביחידה), והקריטריון הוא הגנה בפני עליית טמפרטורת הזקיפים לערך של כ-500°C. אי לכך, לפי אמת המידה של יציבות וחוזק, נדרשים יותר לוחות ובעובי גדול יותר. נקודה זו מחייבת זהירות רבה היות שנתוני היצרנים לעיתים קרובות לא מבחינים בין אמות המידה השונות והקטלוגים שלהם מציגים את הנתונים עבור עמידות אש משיקולי הפרדה בלבד.

כששלד היחידות כולל עמודים ו/או קורות מפלדה רכה, ניתן לבסס את עמידות האש על הגנת שטח באמצעות לוחות, כמו בבנייה הקלה מהסוג הקודם, או להגן ישירות על הרכיבים הבדלים באמצעות תרסיסים או צבעים תופחים. כאשר ההגנה היא מהסוג האחרון (מקומית) הלוחות של הקירות והתקרה נקבעים על פי דרישות ההפרדה בלבד.

רכיבי התקרות בבנייה המודולרית אינם נושאים עומס שימושי, ולכן מבחינת עמידות האש אינם דורשים הגנה מיוחדת. לעומת זאת, רצפות היחידות הן תמיד אלמנט נושא עומס, והגנת האש שלהן מתקבלת מהגנה ישירה על רכיבי הרצפה (למשל באמצעות צבעים תופחים), או ממערכת התקרה ביחידה שבקומה מתחתיהן, או משילוב שלהם. מסיבה זו עובי לוחות התקרה בכל יחידה ומספרם נקבע על פי דרישות עמידות האש לפי אמת המידה של יציבות וחוזק החלות על שלד הרצפה שמעל לתקרה זו, ועל פי אופי הגנת האש של רכיבי השלד הללו (ישירה, באמצעות התקרה בלבד, או משולבת). באופן בלתי תלוי בהחלטה לגבי אופי ההגנה, למערכת הבידוד בין קורות הרצפה, ולמערכת הריצוף, על כל חלקיה (תשתית, וחיפוי הריצוף) אין תרומה בהקשר זה.

כל פרטי התכן והביצוע הנותנים מענה לדרישות בטיחות אש מחייבים על פי חוק וקריטיים לתפקודו התקין של הבניין במקרה של שריפה. אי לכך, גם כאשר מתאימים את התוכניות או החומרים לדרישות לקוח, ו/או במהלך שינויים עתידיים בדירה, יש להקפיד על קיומם בהתאם לאותם כללים. אסור בשום פנים ואופן להסיר חומרים, רכיבים או מערכות המשמשים להגנה בפני אש בלי התמרתם בחומרים, רכיבים או מערכות חליפיים בעלי דרגת תפקוד זהה או משופרת.

8.2.3 הגנה בפני רטיבות

ההיבטים השונים של הגנה בפני רטיבות ונקודות התורפה העיקריות, המחייבות תשומת לב מיוחדת בשלבי התכן והביצוע של בנייה מודולרית, כוללים:

א. הגנה בפני חדירת מי גשם ליחידה – היחידה התלת ממדית המיוצרת במפעל צריכה להגיע לאתר הבנייה כשהיא יבשה וללא שום בעיית רטיבות מובנית מראש. מסיבות אלה יש להבטיח שבעת האחסון והביצוע במפעל כל החומרים ומוצרי הבנייה מוגנים בפני מי גשם ורטיבות מכל מקור אחר. היחידה המוגמרת אמורה לכלול את כל מרכיבי החזית וההגנה בפני גשם על פי התכנון הסופי שלה. כלומר, אם חזית היחידה היא החזית הסופית בבניין (כך שבאתר מבוצע רק איטום של המישקים), היחידה היוצאת מהמפעל כוללת איטום של תקרת היחידה החופף על שכבות

האיטום של הקירות, בידוד תרמי נוסף לביטול גשרים תרמיים אם הוא ניתן מבחוץ, ואת השכבה הדקורטיבית. היחידה במקרה זה כוללת גם חלונות מוגמרים לחלוטין על איטומם למים. אם החזית הסופית של היחידה מותקנת באתר, היחידה כוללת בדרך כלל רק את הלוחות הסוגרים את התקרה ואת הקירות, כולל בקיר החוץ, ואת הפתח לחלון (או לכל היותר חלון מוגמר בצד הפנימי של קיר החוץ, אך ללא משקופים חיצוניים סופיים), בעוד שכל יתר השכבות הסופיות מיושמות באתר (איטום רצוף, בידוד חיצוני נוסף אם דרוש, התקנת חלונות ו/או סגירת משקופים חיצוניים בפתחים ואיטומם, ושכבת גמר דקורטיבית). יחידות שנועדו לקומה העליונה מיוצרות במפעל כבר עם כל המרכיבים של מערכת ניקוז מי הגשם, ועם חלקי מעקה הגג הרלוונטיים להן. ביחידות אלה יש להתקין כבר במפעל מערכת איטום סופית על התקרה, כאשר יריעות האיטום חופפות ברציפות כלפי מטה על גבי כל הקירות, כך שיתאפשר באתר ביצוע יעיל של איטום המישקים, וכלפי מעלה על צינורות ואביזרים היוצאים מהיחידה אל הגג.

באופן בלתי תלוי בשיטת הביצוע של החזית הסופית, כל הקירות והתקרה של היחידה היוצאת מהמפעל צריכים להיות עטופים היטב במעטפת הגנה בפני פגיעות, אשר מגנה עליה גם בפני מי גשם לעת ההובלה וההרכבה באתר. מערכת זו היא זמנית ותוסר בתהליך שמתואם, בהתאם לעונת השנה, עם ההתקנה של מערכת האיטום הסופית של הבניין, כולל האיטום במישקים, בפתחים, וכו'. בכל שלב יש להבטיח שמי גשם לא יחדרו אל רכיב כלשהו של היחידה בגלל שלא הותקן עדיין האיטום הסופי של החזיתות או של גג הבניין.

ב. הגנה בפני חדירת מי גשם לתוך הבניין – העקרונות הכלליים להגנה כוללת של הבניין בפני חדירת מי גשם אל בניין בבנייה מודולרית זהים לאלה שבבנייה הרגילה ומבוססים על הרחקת המים מהגג ומהחזיתות ע"י ניקוז יעיל, והתקנה של מערכת איטום בעלת מספר קווי הגנה. ההתקנה של מערכת הניקוז והאיטום בגג הבניין נעשית באתר על פני כל שטח הגג בתום ההרכבה של כל היחידות בקומה העליונה. כאמור בסעיף א' לעיל, יחידות אלה צריכות להגיע מהמפעל עם שכבת איטום סופית של תקרת היחידה. בשלב ראשון מתקינים באתר את מחסומי האש במישקים שבין היחידות ומעליהם מבצעים את איטום המישקים בפני חדירת מי גשם, כולל מישקים שבין חלקי מעקה של יחידות סמוכות. אם הבידוד התרמי המותקן בתקרת היחידה הוא חלקי בלבד ונדרשת שכבת השלמה באתר, זו תבוצע בדרך בשלב זה. בשלב הבא מתקינים את מערכת השיפועים של הגג (בדרך כלל מבטון קל) ועליה מבצעים איטום רצוף על פני כל הגג, העולה ברציפות על גבי המעקה בכל היקפו, צינורות ואביזרים בולטים מהיחידה, וכו'. יש להקפיד על איטום של המישקים בין ראשי המעקה ועל רציפות נדבך הראש ההיקפי בראש המעקה. פרטי האיטום של הגג, המעקה וסביב מוצאי ניקוז נעשים לפי כל הכללים הרגילים.

ג. הגנה בפני רטיבות ממקורות פנימיים – ההגנה בפני חדירת מים בחדרים רטובים (חדרי רחצה, שירותים ומטבח) מותקנת כמו בבנייה הרגילה, אך במקרה של בנייה קלה דורשת הקפדת יתירה. באופן כללי, בכל החללים הללו יש ליישם מערכת איטום בפני מים על גבי לוחות התשתית לפני

ההתקנה של מערכת הריצוף. במטבח ובחדרי שירותים מערכת זו צריכה לעלות על גבי הקירות עד לגובה ראש מערכת השיפולים ("פנלים") של הקיר. בחדרי רחצה נדרש, כרגיל, איטום למים גם על פני כל הקירות הגובלים במקלחת או באמבטיה.

ביחידות בבנייה קלה הרצפה בדרך כלל אינה מוגנת בפני חדירת מים, ולכן גם בחללים רגילים (שאינם רטובים) עם מערכת ריצוף מאריחים שנהוג לתחזק ע"י שטיפה במים יש לבצע שכבת איטום בדומה למה שתואר למעלה עבור מטבחים וחדרי שירותים. גם כאשר הריצוף הוא באמצעות שטיחים או פרקט מקיר לקיר רצוי לשקול איטום כנ"ל כאמצעי הגנה כנגד אירוע הרטבה אקראי.

ד. הגנה בפני עיבוי ועובש בפני השטח – עיבוי בפני השטח של קירות תקרה ורצפה אינו בהכרח נראה לעין משום שקצב היווצרות הרטיבות לרוב קטן מכוסר הספיגה למים של פני השטח והרטיבות נספגת בפני השטח. הרטיבות המוגדלת, שמצטברת לאורך זמן בשכבת הגמר בגלל קצב אידיי נמוך יחסית בתקופת החורף, עלולה לגרום לצמיחת עובש המהווה מטרד בריאותי ואסתטי. בתנאי שירות רגילים באקלים של ישראל (חורף חמים ולח), כאשר רמת האוורור של דירת מגורים היא סבירה, האמצעי המספיק לצמצום הסיכון לעיבוי בפני השטח הוא התקנה של בידוד תרמי בהתאם לדרישות התקינה. התקן הישראלי לבידוד תרמי, ת"י 1045 קובע דרישות לבידוד תרמי תוך התייחסות לנושא זה גם כן. סעיף 8.2.4 להלן מפרט את מכלול ההיבטים של בידוד תרמי, ולמניעת כפילות, יש לפנות לסעיף הנ"ל.

ה. הגנה בפני עיבוי חבוי – עיבוי חבוי עלול להיווצר בתוך אלמנטים שכבתיים בהם הבידוד התרמי נמצא בין שכבה חיצונית אטומה יחסית לאדי מים (כגון לוח בטון או לוח צמנטי אטום) לבין שכבה פנימית חדירה לאדי מים (כגון לוח גבס), כפי שאופייני ליחידות מודולרית המיוצרות בבנייה קלה. העיבוי מתרחש המקרים אלה בפן הביניים שבין השכבה האטומה לבין שכבת הבידוד, ונספג בתוך שכבת הבידוד ופוגם בכוסר הבידוד שלה. אם מצטברת כמות רטיבות גדולה במהלך חורף לח במיוחד, עלול גם להיווצר עובש חבוי, ופגימה בחומרים רגישים לרטיבות בתוך האלמנט (כגון קורוזיה של זקיפי פח או ריקבון של זקיפי עץ). האמצעי להגנה בפני עיבוי חבוי הוא התקנה של מעכב אדים (קריו לעיתים גם "מחסום אדים") בפן הביניים שבין שכבת הבידוד התרמי לבין החיפוי הפנימי (בדרך כלל לוחות הגבס). האמצעים להתקנת מחסום האדים אינם ייחודיים לבנייה המודולרית וכוללים כרגיל: יריעות מיוחדות מפוליאיתילן או מרדיד אלומיניום, או לחלופין לוחות גבס עם מעכב אדים אינטגרלי בגבם. כללי ההתקנה הרגילים חלים גם כאן, כאשר הקפדה מיוחדת נדרשת על רציפות המערכת.

כל פרטי התכן והביצוע בנושא זה מחייבים על פי חוק וקריטיים לתפקודן של הדירות לאורך זמן. בדרך כלל מערכות ההגנה בפני רטיבות הן חלק מהטכנולוגיה של שיטת הבנייה ואופן ביצוען אינו מושפע מהתאמות לצרכי לקוח או במהלך שינויים עתידיים בתוך הדירה. יחד עם זאת, התאמות ושינויים בתוך הדירה עלולים בהחלט לפגום במערכות הקיימות של האיטום וההגנה בפני רטיבות

ממקורות פנימיים בדירה. אי לכך, גם כאשר מתאימים את התוכניות או החומרים לדרישות לקוח או במהלך שינויים עתידיים בדירה יש להקפיד על קיום כל הכללים הנוגעים למניעת בעיות רטיבות ממקורות פנימיים ולהגנה בפני עיבוי חבוי. במקרה של הסרת חומרים או מערכת שנועדו להגנה בפני רטיבות יש להתקין במקומם חומרים או מערכת בעלי תפקוד זהה או משופר.

8.2.4 בידוד תרמי ותפקוד אנרגטי

ההיבטים השונים של בידוד תרמי ותפקוד אנרגטי ונקודות התורפה העיקריות, המחייבות תשומת לב מיוחדת בשלבי התכנון והביצוע של בנייה מודולרית, כוללים:

א. אבחון סוג הבנייה – כאמור בפרק 5, בבנייה מודולרית שואפים בדרך כלל לעבוד עם יחידות תלת ממדיות קלות ככל האפשר. מסיבה זו הן מבוצעות לרוב מבנייה קלה, כולל רצפה שהיא קלה בהרבה מזו הנהוגה בבנייה הרגילה. גם כאשר היחידות מבוצעות מבטון, נוהגים לבצע את הקירות והתקרה מאלמנטים קלים (מסה ליחידת שטח קטנה מ- 50 ק"ג למ"ר), ורק הרצפה מבוצעת מבטון, וגם אז לעיתים מבטון קל על סיפון זיון מפח פלדה. בהתאם להגדרות בתקן הישראלי ת"י 1045, בנייה כזו מסווגת כ- "בנייה קלה", ולכן דרישות הבידוד התרמי החלות עליה הן בהתאם לאלה החלות על סוג זה בתקן הנ"ל.

בתקן הישראלי ת"י 5280 מבחינים גם בבנייה קלה מאוד, בה האלמנטים קלים במיוחד (רצפה או תקרה פחות מ- 15 ק"ג למ"ר, קירות חוץ פחות מ- 30 ק"ג למ"ר, מחיצות פחות מ- 10 ק"ג למ"ר). בהתאם לכך, בנייה מודולרית עם יחידות נושאות עם שלד מפלדת קונסטרוקציה או מפרופילים דקי דופן וגמר מהחומרים המקובלים (לוחות גבס וכד') לא תהיה מהסוג של "בנייה קלה מאוד", והתכן האנרגטי שלה יבוצע גם כן על פי הדרישות המתאימות ל- "בנייה קלה". משמעות הדבר, בין היתר, היא שניתן לתכנן את ההיבטים האנרגטיים לפי המסלול המרשמי או התפקודי, בהתאם לבחירת המתכנן.

יש להדגיש שאם מיישמים בבנייה קלה רמת בידוד תרמי דומה לזו שבבנייה הקונבנציונלית, התפקוד האנרגטי שלה נחות באופן ניכר, וזאת בשל העדר מסה תרמית פנימית, החשובה במיוחד לתפקוד הכולל בעונות המעבר ובקיץ. אי לכך, כדי להגיע לרמה סבירה של תפקוד אנרגטי, דרישות הבידוד התקניות גבוהות יותר. אמצעי נוסף לשיפור התפקוד האנרגטי של בנייה קלה הוא יישום של לוחות פנימיים מחומרים משני פאזה (PCM) עם טמפרטורת מעבר בסביבות 23°C , המאפשרים אגירה ופריקה של אנרגיה. תכן אנרגטי של בנייה עם לוחות פנים מסוג זה ניתן לבצע רק לפי מסלול תפקודי, ולכן בחישוב לפי המסלול המרשמי לא יבוא לידי ביטוי השיפור המושג ביישומם.

ב. בידוד תרמי תקני – היחידות המיוצרות במפעל יוצאות ממנו עם הבידוד התרמי בחתכים העיקריים של קירות החוץ, קירות הפרדה, ולפי הצורך גם בתקרות וברצפות. החומרים לביצוע

הבידוד התרמי ומיקום שכבות הבידוד תלויים בשיטת הבנייה הספציפית, אך ניתן להבחין במספר כללים עקרוניים כלהלן: בחלקי קיר מבטון הבידוד יהיה בדרך כלל מצמר מינרלי בצד הפנימי של הקיר ויוסתר ע"י לוחות גבס המותקנים על גבי זקיפי פח מעוצב בקר. בחלקי קיר קלים מזקיפים עם לוחות משני הצדדים, הבידוד יהיה גם כן מצמר מינרלי שמיושם בחללים שבין הלוחות והזקיפים. בכל המקרים יש להקפיד על מילוי מלא של החללים כדי למנוע זרימת אוויר סביב חומרי הבידוד. כמו כן יש להקפיד על ההתקנה של מעכב אדים בפן הביניים בין לוחות הגבס לבין שכבת הבידוד כמפורט בסעיף 3.2.3-ה'. הבידוד התרמי נדרש גם בקירות ההפרדה בין היחידות לבין הגרעין המרכזי, והוא יבוצע כנ"ל בקירות היחידות הצמודים לקירות הגרעין. בגג הבניין ניתן להתקין חלק ניכר של הבידוד התרמי בתוך התקרות של היחידות העליונות, ואז יש צורך להשלים מעל לגג רק את החלק הנותר באמצעות שכבת השיפועים מבטון קל. אם זו אינה מספיקה יש כמובן צורך להשלים מתחתיה שכבת בידוד רציפה שתבוצע בדרך כלל מלוחות פוליסטירן מוקצף או מפוליאורטן מוקצף המותז באתר. כאשר חלק מתקרה של יחידה מהווה רצפת מרפסת ביחידה שמעליה (כמו בבנייה מדורגת), הבידוד של התקרה יותקן במלואו בתוך תקרת היחידה, וברצפת המרפסת אין צורך בבידוד נוסף, למעט כמפורט בסעיף הבא לצמצום השפעת הגשר התרמי בתחתית הקירות של היחידה עם המרפסת. בבנייה מדורגת בה תחתית יחידה בולטת מעבר לקיר של יחידה שמתחתיה, רצפת היחידה הגלויה לאוויר מחייבת בידוד תרמי. הבידוד בחתכים העיקריים יבוצע במקרים אלה מעל לשכבת הבטון כשהרצפה היא מבטון, או בחללים שבין קורות הפלדה לבין לוחות הסגירה כשרצפה היא מאלמנטים קלים.

ג. צמצום ההשפעה של גשרים תרמיים – ביצוע היחידות התלת ממדיות כולל בדרך כלל רכיבי פלדה בכל האלמנטים (קירות, תקרות ורצפות). לפלדה מוליכות תרמית גבוהה במיוחד (50 וואט למ' קלווין), ולכן כשרכיב הפלדה עובר מצד לצד הוא יוצר גשר תרמי. בכל שיטות הבנייה המקובלות לבניית היחידות לוחות החיפוי הפנימיים של הקירות מחוברים לזקיפים מפח פלדה מעוצב בקר. בין אם יש להם תפקיד נושא או לא, הזקיפים נמצאים במרחקים קרובים יחסית (כ- 30 עד 60 ס"מ באלמנטים נושאים, וכ- 60 ס"מ באלמנטים שאינם נושאים) ויוצרים מערכת צפופה יחסית של גשרים תרמיים. גשרים תרמיים בעלי תחום השפעה גדול במיוחד קיימים במקומות הדורשים הקשחה כמו בפינות היחידות (בין אם הפינה כוללת רק הקשחות מזקיפי פלדה או שהיא כוללת גם עמוד מפרופילי צינור מרובע), וכן במפגשים של התקרה והרצפה עם קירות החוץ. האמצעים לצמצום ההשפעה של הגשרים התרמיים תלויים בשיטת הביצוע הספציפית. להלן מספר עקרונות לפי סוגי הבנייה השונים:

עבור בנייה עם קירות מבטון יש להפריד את הזקיפים התומכים את לוחות הגבס מקיר הבטון באמצעות שכבת בידוד רציפה או מקומית.

עבור קירות מפלדה נהוגות שתי שיטות שונות: 1) התקנה כרגיל של הבידוד התרמי בין הזקיפים. התקנה של פרופילי אומגה אופקיים בצד הפנימי של הזקיפים האנכיים, כשהם מופרדים מהאנכיים

בנקודות החיבור באמצעות מפריד תרמי, והתקנה של שכבת בידוד נוספת בין פרופילי האומגה לבין לוח הגבס. 2) התקנה כרגיל של הבידוד התרמי בין הזקיפים, והתקנת בידוד חיצוני נוסף על גבי הלוחות הסוגרים את הקירות מבחוץ. במקרה זה יש להבטיח שמערכת הגמר הסופית מהווה הגנה בפני מי גשם ותמנע חדירת רטיבות אל שכבת הבידוד החיצונית.

כשרצפה מפלדה עם בידוד תרמי בין הקורות נמצאת מעל לאוויר החוץ (בנייה מדורגת עם קומה מובלטת החוצה מעל לקומה שמתחתיה) צריך גם כן להגן על הגשרים התרמיים. הוספת הבידוד יכולה להיות חיצונית, מתחת לקורות הרצפה, או פנימית, מעל ללוחות התשתית).

גשרים תרמיים נוספים שייחודיים לבנייה המודולרית נובעים מההכפלה של קירות ואלמנטי תקרה-רצפה בכל המפגשים בין יחידות. כאשר ההגנה על הגשרים עקב זקיפי הפלדה מבוססת על הוספה של מערכת בידוד חיצונית, היא פותרת גם את הגשרים הנוצרים בכל המפגשים הללו, וזאת בתנאי שתעבור ברציפות על פני כל השטח של הקירות, מתחתית הרצפה ועד פניה העליונים ביותר של התקרה. את המישקים האנכיים והאופקיים שבין היחידות יש לאטום על מנת שהאוויר במרווחים (בין קירות סמוכים, ובין תקרה לרצפה שמעליה) יהיה כלוא, ולא תתאפשר הסעה של אוויר חוץ בתוכם. כאשר אין שכבת בידוד חיצוני רציפה, ובידוד הגשרים התרמיים בקירות הוא בצד הפנים, יש להתקין בידוד תרמי בתקרת כל היחידות (ע"י צמר מינרלי דחוס היטב בין הקורות), ושכבת בידוד רציפה על גבי כל הרצפה (על גבי לוחות התשתית או הבטון הנושאים את מערכת הריצוף) שעולה בהיקף ומגיעה עד תחתית הבידוד הנוסף בקירות.

ד. איטום להסתננות אוויר דרך המעטפת – בבנייה מרכיבים מתועשים קיימים מפגשים רבים בין הרכיבים. מפגשים אלה הם "יבשים", כלומר כוללים מגע בין החומרים ללא יציקה או הדבקה ביניהם. במפגשים כאלה קיים מרווח אוויר שעוביו יכול לנוע בין דק מאוד (נימי) לעבה (מספר מילימטרים), אך בכל מקרה הוא מאפשר הסתננות אוויר דרכו. כאשר קיימת הסתננות אוויר בלתי מבוקרת בין פנים היחידה לאוויר החוץ העומס האנרגטי על חימום בחורף וקרור בקיץ גדל באורח ניכר וגורם לאובדן אנרגיה בלתי מתוכנן. יתרה מזאת, הסתננות אוויר עלולה לפגום גם בתפקוד האקוסטי של הבניין ובאיכות האוויר שבו. הדרישות לאטימות מעטפת הבניין לאוויר נקובות בתקן הישראלי ת"י 5280 חלק 1.1. שיטת האיטום לאוויר היא ספציפית לשיטת הביצוע של היחידות, תלויה באיטום הנובע ממערכות אחרות, כגון מעכבי אדים ואיטום למים. אין בספרות כללים מנחים לגבי אופן ביצוע בבנייה המודולרית, ובדרך כלל נדרשת בדיקה של אטימות היחידה בשלב הבדיקה של אבטיפוס. בדיקה זו צריכה להתבצע לאחר טלטול היחידה בתהליך המדגם את תהליכי השינוע, וההרכבה.

ה. הוכחת התפקוד האנרגטי – הוכחת התפקוד האנרגטי צריכה להתבצע בשלב זה באמצעות התחשיב של מקדם ההפסדים ליחידת שטח, H, בהתאם לנקוב בתקן הישראלי ת"י 1045. לאחר שיאומץ התקן הישראלי ת"י 5280 חלק 1.1 בתקנות אפשר יהיה לבצע תחשיב חליפי בגישה

התפקודית. כפי שנאמר בסעיף א', הבנייה המודולרית היא בדרך כלל מהסוג של "בנייה קלה", ולכן בהתאם לתחשיב שבוצע עליה לעמוד בדרישות ובקריטריון החלים על "בנייה קלה". עם רמת בידוד תרמי

כל פרטי התכן והביצוע בנושא זה מחייבים על פי חוק וקריטיים לתפקודן התקין לאורך הזמן של הדירות מבחינת השגת נוחות תרמית סבירה והפחתת הסיכון לעיבוי בפני השטח הפנימיים של המעטפת, תוך מניעת אובדן אנרגיה בלתי מבוקר. בדרך כלל מערכות הבידוד התרמי חבויות בתוך אלמנטי הבניין, מהוות חלק אינטגרלי של שיטת הבנייה, ואינן מושפעות מהתאמות לצרכי לקוח. לעומת זאת, התאמות ושינויים בתוך הדירה עלולים בהחלט לפגום במערכות בידוד תרמי פנימיות. אי לכך, במהלך שינויים עתידיים בדירה יש להקפיד על קיום כל הכללים הנוגעים לבידוד תרמי פנימי. במקרה של הסרת חומרים או מערכת שנועדו לבידוד תרמי, עיכוב אדים או חסימת אוויר יש להתקין במקומם חומרים או מערכת בעלי תפקוד זהה או משופר.

8.2.5 תפקוד אקוסטי

ההיבטים השונים של התפקוד האקוסטי ונקודות התורפה העיקריות, המחייבות תשומת לב מיוחדת בשלבי התכן והביצוע של בנייה מודולרית, כוללים:

א. הפרדה אקוסטית בפני קול נישא באוויר – באופן בלתי תלוי בסוג השלד ובחומרי שלד היחידה, מחיצות בתוך היחידה התלת ממדית מבוצעות כמחיצות קלות, באופן הזהה לשיטת ביצוע בבנייה הקונבנציונלית, ולכן חלים עליהן כל כללי התכן והביצוע הרגילים. גם הצנרת והמערכות הסניטריות הכלולים בתוך היחידה מבוצעים למעשה בשיטות רגילות. לפיכך, כל הפרטים הרלוונטיים לתפקודם האקוסטי של המחיצות והמערכות שבתחום היחידה חלים גם כאן.

מחיצות בתוך הדירה המתקבלות מקיר מעטפת כפול של שתי יחידות סמוכות הן בעלות בידוד אקוסטי משופר בזכות הקיר הכפול ונקודת התורפה להפרדה אקוסטית היא למעשה, כמו בכל מחיצה רגילה בתוך דירה, הדלת שכושר ההפרדה האקוסטי שלה תמיד קטן יותר. מסיבה זו היתרון של הקיר הכפול יכול לבוא לידי ביטוי רק במחיצות הפרדה מקיר כפול שאין בהן פתחים. פתחי דלתות ומעברים בין היחידות מהווים בכל זאת נקודת תורפה מיוחדת מבחינה התפשטות רעש לגובה ולרוחב הבניין, ולכן מיועד להם סעיף ב' להלן.

קירות הפרדה בין דירות וקירות הפרדה בין הדירה לבין חללים ציבוריים בבניין הם תמיד קירות כפולים (או שני קירות קלים כמו במפגש של שתי יחידות סמוכות, או קיר קל וקיר בטון כמו במפגש של יחידה עם גרעין הבניין) עם חיבורים נקודתיים בלבד (בנקודות חיבור בודדות של השלד הממוקמות בדרך כלל במפלסי רצפה ותקרה). אי לכך ההפרדה האקוסטית המתקבלת היא גדולה במיוחד. יחד עם זאת, גם במקרה זה פתחים הם נקודת תורפה ולכן דלת הכניסה הראשית

ליחידה, הממוקמת במקרים רבים כפתח מעבר בקיר הכפול של הגרעין והיחידה המודולרית, דורשת שימת לב מיוחדת, כמפורט בסעיף ב'.

רצפות-תקרות המפרידים בין דירות גם כן מבוססים על אלמנטים כפולים. תקרת היחידה היא בדרך כלל קלה מאוד, אך מקנה כבר בידוד אקוסטי חלקי, ומעליה נמצא מרווח אוויר שמעליו באה רצפת היחידה הבאה, שהיא תמיד כבדה יותר ומבוצעת מחומרים ומוצרי בנייה אחרים. הצירוף השכבתי הזה מאפשר בדרך כלל הפרדה אקוסטית משופרת לקול נישא באוויר. היות שלא קיימים פתחים באלמנט כפול זה נקודת התורפה שהם מהווים בקירות הכפולים לא קיימת כאן.

קירות החוץ של היחידה, האמורים להפריד מרעשי החוץ, הם לרוב קירות קלים שכושר ההפרדה האקוסטי שלהם קטן יחסית לזה של קירות חוץ מבטון או מבלוקים. יחד עם זאת, פרטי הביצוע של קירות כאלה מוכרים בבנייה הקלה הרגילה (לוחות גבס כפולים בצד הפנים, לוח מחומר אחר ועובי אחר בצד החוץ, צמר מינרלי בתווך, אטימה טובה ומלאה של חרכים ומרווחים, וכד) וחלים גם במקרה זה, כולל כאשר מצוי בקיר חלון.

ב. דלתות ומעברים בין יחידות – המרווחים שבין היחידות יוצרים, כאמור בסעיף 8.2.2 פסקה ג', רצף של חלל סמוי שמאפשר הסעת אוויר, ומבחינה אקוסטית גם רצף של העברת גל לחץ אקוסטי. מסיבה זו רעשים בחללים, שביניהם נמצא פתח הדלת או המעבר שבין היחידות, עלולים להתפשט דרך משקוף הדלת אל המרווח שבהיקפו ודרכו לחללים מרוחקים יותר בבניין, אליהם יחדרו שוב דרך משקופי הפתחים. האמצעים הדרושים לחסימת אש (סביב כל ההיקף של הפתחים, ובראשי כל המרווחים בין היחידות במפלסי התקרות) יעילים בדרך כלל גם מבחינה אקוסטית, ולכן בגלל החשיבות הבטיחותית של מניעת התפשטות אש נהוג לפתור תחילה נושא זה ולוודא (בבדיקת אבטיפוס) אם הוא מקיים גם את ההפרדה האקוסטית.

ג. הפרדה אקוסטית בפני קול הולם – ההפרדה כנגד קול הולם מושפעת בעיקר משני גורמים: (1) סוג הריצוף העליון ואופן יישומו, (2) קיומם של גשרים קשיחים בין שכבת הריצוף לבין שכבות הגמר בחללים אחרים. הכללים המפורטים בתקן הישראלי ת"י 1004 למערכת הריצוף תקפים עקרונית גם כאן, כאשר הנקודה העיקרית לשימת לב היא ההפרדה המלאה בין מערכת הריצוף לבין התשתית ותחתית הקירות באמצעות שכבת בידוד אקוסטית ייעודית העוברת ברציפות על כל שטח הרצפה ועולה על גבי הקירות עד תחתית השיפולים, באופן שאין כל מגע בין הריצוף הקשיח לבין לוחות הגמר של הקיר.

ד. הפרדה בפני רעשי מערכות שירות – הפרדה אקוסטית בפני רעשי צנרת וקבועות תברואה בתוך היחידה תבוצע לפי כל הכללים הרגילים. הפחתת רעש ממערכות מיזוג בעייתית לעיתים משום שמיקומן של מערכות אלה על רצפה קלה ומעבר לקיר קל מחייב הקפדה יתירה הן על הניתוק והבידוד של המערכת מהרצפה על מנת למנוע מעבר תנודות וקול הולם דרך הרצפה, ועל פרטי הקיר שלעיתים לא נועדו להפריד מעוצמות רעש של מערכת שלא טופלה במקור כראוי. באופן

כללי, כאשר מערכת המיזוג המוגמרת היא חלק אינטגרלי של המערכות הנמסרות עם הדירה רצוי להתקין בבנייה מודולרית קלה מערכות מיזוג המבוססות על מערכות מדחס ומעבה שהן שקטות יחסית ולבצע בדיקות אקוסטיות תקניות לפני המסירה. כשהמערכת אינה נמסרת עם הדירה יש לציין במפורש בתדריך הנמסר לדייר שעליו להתקין מערכת שקטה יחסית.

ה. חריקות ורעשי קונסטרוקציה – במחברים בבנייה יבשה המבוססים על חיבור בברגים (וכן במסמרות, שבדרך כלל אינן בשימוש כיום) עלולות להיווצר, במקרה של הידוק בלתי מספיק, תזוזות יחסיות קלות מאוד של הרכיבים המחוברים, היוצרות רעש בתדר גבוה מאוד הנשמע כחריקה טורדנית. האמצעים למזעור תופעה זו הם: (1) במחברים של חלקי מבנה, שנועדו להעברת כוחות ובהם המגע בין חלקי המתכת חייב להתקיים ללא שום אמצעי מתווך – חיבור מהודק היטב, המבוסס על מערכת של מספר ברגים בשני הכיוונים, כך שהתנועה היחסית בין חלקי המתכת תימנע גם במקרה שאחד הברגים לא יהודק מספיק או שישתחרר קלות, (2) במגע בין חלקים מתכתיים צמודים, או בחיבור גיאומטרי בין אלמנטים לא נושאים (מחבר שאינו מעביר כוחות) – ישום יריעה גמישה דקה (בדרך כלל מגומי חזק) בין חלקי המתכת שתמנע התחככות של מתכת במתכת, אך אם נדרש בפרט הספציפי, תבטיח חיבור לצורך דיוק המיקום הגיאומטרי.

כל פרטי התכן והביצוע בנושא זה מחייבים על פי חוק וקריטיים לתפקודן התקין של הדירות מבחינה אקוסטית. ההפרדה האקוסטית מושגת באמצעות מבנה אלמנטי הבניין, ואין כיום כלים חישוביים להערכתה. אי לכך בשיטות ספציפיות שאין עבורן עדיין מדידות ואישורים לגבי ההפרדה האקוסטית המושגת על ידי החתכים האופייניים ופרטי הבניין הספציפיים, יש הכרח לבצע מדידות על אבטיפוס על מנת לוודא שכל נקודות התורפה קבלו מענה מתאים.

התאמות לצרכי לקוח אינן מחייבות לרוב שינויים במבנה החתכים ובפרטי הבניין האופייניים, ולכן היבט זה אינן פוגם בתפקוד האקוסטי. לעומת זאת, התאמות ושינויים הנעשים בתוך הדירה, כגון הגדלה, העתקה, הוספה וכד' של פתחים, עלולים בהחלט לפגום בכושר ההפרדה האקוסטית בבניין. אי לכך, במהלך שינויים עתידיים בדירה יש להקפיד על קיום כל הכללים הנוגעים להפרדה האקוסטית והגורמים המשפיעים עליה. במקרה של הסרת חומרים או מערכת שנועדו להפרדה אקוסטית יש להתקין במקומם חומרים או מערכת בעלי תפקוד זהה או משופר ולהקפיד על כללי הביצוע המותאמים.

8.2.6 קיים

א. אורך חיים תכנוני – אורך החיים התכנוני הנדרש מבניין בבנייה מודולרית זהה לזה שבבנייה הקונבנציונלית. בבנייה המודולרית יש מרכיבים רבים של בנייה קלה, אשר רגישה יותר לבלייה בגלל אופי החומרים ועובייהם הדק. אי לכך יש לשים דגש רב על איכות הבנייה של היחידות המיוצרות במפעל, ובעיקר על האטימה למים ולחדירת רטיבות אל תוך חלקי הבניין, שהיא אחד הגורמים העיקריים בקיצור אורך החיים בפועל של מרכיבי הבניין. תנאים מחייבים להבטחת אורך חיים גבוה לבנייה מסוג זה כוללים:

- תכנון מראש של כל אמצעי ההגנה בפני בלייה על סוגיה השונים כפורט בהמשך,
- שימוש בחומרים העומדים בכל דרישות התקנים החלות עליהם,
- הימנעות משימוש בחומרים שאין להם תקינה מסודרת,
- הימנעות משימוש בחומרים שאין איתם ניסיון בשימוש בבנייה קלה בתנאי הארץ,
- ביצוע קפדני ומבוקר באמצעות בדיקות בקרת איכות פרטניות של כל פרטי התכנון בהקשר זה,
- בדיקות אטימות למים של יחידות אבטיפוס,
- הגנה על היחידות בפני פגיעות ישירות וסדיקה או שבר של רכיבים בעת ההובלה וההרכבה (כולל בעת אחסון ביניים אם ישנו),
- הגנה על היחידות בפני חדירת מים עד תום הביצוע של מערכת האיטום הסופית של הבניין,
- מתן הנחיות ברורות למשתמש לגבי בדיקות תקופתיות ותחזוקה מתוכננת מראש בהיבטים שנלקחים בחשבון כמשלימים את ההגנה הראשונית.

ב. בלייה כימית – בלייה כימית גורמת לשיתוך (קורוזיה) ומוגברת באווירה לחה, קרוב לים התיכון וים המלח, ובסביבות תעשייתיות בהן קיימת נוכחות מוגברת של מלחים כגון סולפטים וכלורידים באוויר.

כאשר קיימים בבנייה המודולרית מרכיבים מבטון, הכללים החלים עליהם להגנה בפני שיתוך קבועים בתקן הישראלי ת"י 466, כולל כל ההקלות הניתנות לבנייה טרומית (מבחינת עובי הכיסוי על הזיון וכד') בהקשר לסוג המבנה מבחינת תנאי החשיפה.

בדומה לכך, שלד מפרופילי פלדה מעורגלים יעמוד בכל הדרישות המפורטות בתקן הישראלי ת"י 1225. לגבי בנייה מרכיבים מפח פלדה מעוצב בקר התקינה בישראל חסרה עדיין, ומומלץ להשלימה תוך זמן קצר על ידי אימוץ תקינה בינלאומית, ולקבוע בה את כל הכללים החלים על גלבון הפח בהתאם למיקום הפרויקט ולרמת החשיפה לשיתוך, כפי שהם צריכים לבוא לידי ביטוי בהשלמות הלאומיות המותאמות לתנאי הארץ.

ג. בלייה מכנית – בלייה מכנית עלולה להתרחש בפני השטח כשרכיבים נתונים לשחיקה, ולעומק החומר כשהרכיבים חשופים לפגיעות מכניות.

החשיפה לשחיקה בבנייה המודולרית דומה לזו הקיימת בבנייה הקונבנציונלית, ובדרך כלל הנושא מקבל ביטוי בתקנים של חומרי הגמר המשמשים לחיפוי קירות ולריצוף.

החשיפה לפגיעות מכניות, לעומת זאת, מוגברת מאוד בבנייה המודולרית משום שבנוסף לחשיפה הרגילה בבניין הגמור, קיימת חשיפה לאורך כל התהליך מרגע יציאת היחידה מקו הייצור במפעל (בהנחה שעד לשם היא נבדקה בקפידה על פי כל נהלי בקרת האיכות הקיימים במפעל ובמקרה של פגיעה כלשהי בוצעו תיקון או החלפה מלאה המבטיחים את שלמות היחידה המוגמרת) עד

לסיום ההרכבה באתר. יתר על כן, היות שהקירות, התקרה, ורצפת היחידה מבוצעים בדרך כלל בבנייה קלה, המבוססת על לוחות דקים מחומרים חלשים יותר מאלה הנהוגים בבנייה הקונבנציונלית, הרגישות של היחידה לפגיעות מכניות בתהליך העברתה מקו הייצור עד שהיא מורכבת סופית באתר גדולה במיוחד. היות שלכל שכבה במבנה היחידה יש תפקיד חשוב בהבטחת תפקודה התקין, והיות שלחיפויים יש באופן כללי תפקיד מכריע בהגנה בפני מפגעי רטיבות על סוגיהם השונים (סעיף 8.2.3), הרי פגיעות מכניות בראשית חיי הבניין (ואפילו סדקים נימיים ושבר קל במקומות שלאחר מכן נשארים חבויים) עלולות לגרום לפגימה ביכולתו של החיפוי לספק את ההגנה הדרושה, ובכך להאיץ בלייה של רכיבי מבנה, כולל רכיבי הקונסטרוקציה שמוסתרם על ידי שכבת החיפוי שנפגעה. להגנה על היחידה בפני פגיעות מכניות עם סיום ייצורה יש לפיכך חשיבות מכרעת בהבטחת הקיים ואורך החיים התכנוני של הבנייה המודולרית. עטיפת היחידה באופן שמבטיח הגנה מתאימה בהתאם לסוג הטלטולים שעליה לעבור עד לסיום ההרכבה (על פי המרחק מהמפעל לאתר, סוג הדרך, הצורך בהובלה ימית, הצורך באחסון ביניים, וכד') הוא מרכיב חשוב בתהליך הייצור (פרק 8.4).

ד. בלייה סביבתית – חזיתות הבניין חשופות לגורמי בלייה סביבתיים רבים, הפועלים בה בעת על רכיבי החזית וגורמים במשך הזמן לבלייה של פני השטח (כגון: אוויר לח ומזהם שמאיץ שיתוך, מי גשם שגורמים לשחיקה ונספגים לתוך החומר, רוח נושאת אבק שגורמת לשחיקה). קצב הבלייה ועומק חדירתה לתוך הרכיב משתנים מחומר לחומר ותלויים בהרכבו הכימי, צפיפותו, ואופי ההגנה שניתנה לו ולפני השטח. בבנייה לגובה נהוג לכן בישראל, במרבית היישובים, לדרוש שחזיתות הבניין תבוצענה מ"חומרים קשיחים". אחת התופעות הנפוצות בחזות האורבנית בארץ היא שכמעט כל הבנייה של בניינים גבוהים ואפילו רבי קומות היא עם חיפוי אבן. בשנים האחרונות החלו ליישם בבנייה הגבוהה קירות מסך מרכיבי אלומיניום וזכוכית לצד קירות עם חיפוי אבן, ובבנייה של רבי קומות גבוהים במיוחד כמעט כל החזיתות הן מקירות מסך בלבד. שיטות נוספות שחודרות לארץ כוללות יישום של "חזיתות מאווררות" המסתירות את פני הקיר שמאחוריהן ומגנות עליו מפגיעת מי גשם, ושל חיפויים דקורטיביים מלוחות מתכתיים התלויים ביבש על פני כל החזית או חלק ממנה במקום חיפוי האבן.

בבנייה המודולרית היישום של חיפוי אבן בלתי אפשרי משום שבגלל גודלן המטרה היא להקטין את משקלן ככל האפשר. בקירות חזית נושאים המבוססים על מסגרות בשיטת ה-LWSF (ראה סעיף 5.2.4 ופרק 8.2.1), מבנה הקיר כולל מערכת שכבתית כאשר בחזית מותקנים לוחות חיפוי מחומרים שהוכחו כבעלי עמידות מתאימה לתנאי החשיפה. לוחות כאלה לא ניתן לתקן, ובמקרה של סדיקה, שבר או בלייה מואצת של פני השטח יש להחליפם. אי לכך, ככל שהבנייה גבוהה יותר, נדרשת הקפדה גדולה יותר על טיב הלוחות על מנת להבטיח שלא יהיה צורך לבצע עבודות של החלפת לוחות בגובה רב. כשאין צורך בקיר נושא בחזית היחידה, אפשר לבצעו כקיר מילוי בעל מבנה דומה לזה של קיר LWSF, אך עם זקיפים בעלי דופן דקה יותר, או כקיר מסך. היות

שההתקנה של קירות מסך כחלק אינטגרלי של היחידה קלה לביצוע, וכן משום שקיים ניסיון רב עם עמידותם של קירות אלה בפני בליה סביבתית, התקנתם בבנייה המודולרית לגובה שכיחה. הכללים החלים על קירות מסך לפי התקן הישראלי ת"י 1568 תקפים במקרה זה גם כן. האפשרות הנוספת השכיחה בבנייה המודולרית היא סיום חזית היחידה במפעל בלוחות מחומר עמיד במים אך ללא גמר סופי, והשלמת פני חזית הבניין באתר באמצעות מערכת חיצונית של קירות מסך, או באמצעות מערכת שכבתית הכוללת איטום רציף, השלמות בידוד תרמי לביטול גשרים תרמיים, וחיפוי דקורטיבי באמצעות לוחות תלויים ביבש. הכללים שפורטו לעיל לסוגי חיפוי אלה על מנת להבטיח את עמידותם בפני בליה סביבתית חלים גם במקרה זה.

ה. תחזוקה – תחזוקה נכונה נחשבת באופן כללי כמרכיב חשוב בהבטחת הקיים והתפקוד התקין לכל אורך החיים התכנוני של הבניין. כאשר פעולות מסוימות של תחזוקה, ובכלל זה בדיקות תקופתיות ספציפיות, נלקחות בחשבון בתכנון ובביצוע של חלקי בניין חייבים להנחות את דיירי הבניין לגבי הצורך בביצוען ולהבהיר לו את פרטי הביצוע הנדרשים. הבנייה המודולרית אינה שונה מבחינה זו מהבנייה הקונבנציונלית. ההנחיות צריכות להיות מפורטות במיוחד בכל הנושאים בהם לדייר הישראלי אין היכרות מוקדמת וניסיון עבר ולכן אינו מורגל בתחזוקתם, כגון: כאשר קיימים חומרים ורכיבים שאינם שכיחים בבנייה הקונבנציונלית ולכן לא יודעים כיצד לנקותם או לתקנם, כשהגישה למערכות הבניין או לחיבוריהן חייבת להתבצע באופן מוגדר וייחודי וממקומות ייעודיים לכך בלבד, כשקיימים אטמים שדורשים החלפה תקופתית ברמת הבניין השלם, כשמותקנים חיישנים לבחינת היווצרות שיתוך ודורשים מעקב תקופתי, וכד'.

8.3 היבטים של מערכות שירות

בניתוח החלופות לביצוע מערכות השירות של הבניין במסגרת הבנייה המודולארית ניתן לצאת מנקודת הנחה שבנייה מודולארית לגובה תתבסס בישראל על גרעין בטון מרכזי שיכיל את השטחים הציבוריים בקומות וכן את פירי המערכות, ומסביבו יוערמו המודולים (ראה המחשה אדריכלית בציור 8.1.2 ו-8.1.15). לפיכך יהיה צורך לפתור את מרבית המערכות האנכיות בשיטה הקונבנציונלית במסגרת גרעין המבנה. יחד עם זאת ישנה עדיין אפשרות לביצוע מערכות אנכיות בין הקומות במסגרת המודולים, אך גם במקרים אלה עדיף לבצע את הירידות בשכנות לשטחים היכולים להיות נגישים מגרעין המבנה. כל זאת על מנת למנוע, ככל שניתן, את הצורך להיכנס במהלך ההקמה לתוך המודולים על מנת לחבר את המערכות השונות ביניהן.

התקנת כל המערכות בתוך כל מודול תהיה במפעל, כאשר העבודה באתר תכלול חיבורים בלבד ללא תוספות כלשהן, ככל שניתן. יש לקבוע מראש חלוקת אחריות בין המפעל והאתר, וכן להסדיר את נוהל בקרת האיכות של היחידות המודולאריות, בשלב ראשון עם עזיבתן את המפעל ובשלב שני במסגרת בחינה כוללת של המערכות המוגמרות בסיום הפרויקט.

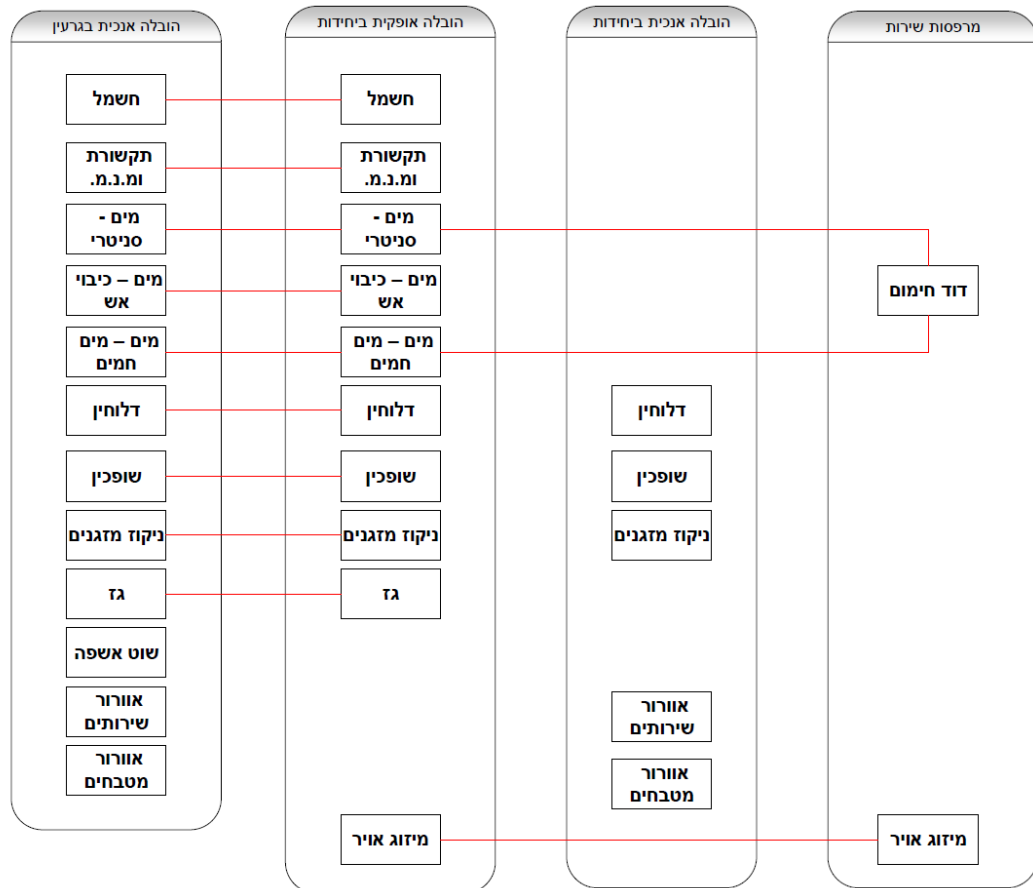
ניתן לסכם את האופציות להעברת מערכות בבנייה המודולארית באחת מהנקודות הבאות או שילוב שלהן, כדלקמן:

- שימוש בחללים הציבוריים לפרישת המערכות בין אם בפרוזדורים המהווים חלק מהמודולים ובין אם בהעברה לפירים אנכיים בגרעין המבנה,
- שימוש בחללי רצפות ותקרות לפרישת המערכות,
- ביצוע נקזים אנכיים בפינות המודולים,
- חיבור אזורים רטובים גב אל גב על מנת ליצור ריכוז של שטחי שירות.

התרשים להלן (ציור 8.3.1) ממחיש את האפשרויות השונות לחיבור מערכות במבנה, הן בין הגרעין היצוק לבין היחידות והן במסגרת היחידות ובין היחידות לבין עצמן. ההובלה האופקית בין היחידות לבין הגרעין (ראה למשל חשמל, תקשורת, ומ.נ.מ.) אינה צפויה להוות מכשול כלשהו בפני הייצור וההרכבה בשטח, למעט במקרה של מנייה נפרדת בין היחידות השונות (ראה להלן "הערות למערכות החשמל השונות"). לעומת זאת ניכר כי הביצוע האנכי של מערכות הניקוז והאוורור עלולות להעמיד אתגרים בפני המבצע, בין השאר עקב בעיות המפורטות להלן:

- דלוחין ושופכין – יש לשאוף למקם את חדרי השירותים ככל שניתן בסמיכות לגרעין המבנה על מנת לאפשר גישה לחיבורים הן במהלך ההתקנה והן לצרכי אחזקה בעתיד (בפרויקט SOHO, שנסקר על ידי Gardiner 2015, תואר מיקום יחידות שירותים באמצע מודול כגורם מפריע בפרויקט עקב הצורך בכניסה לתוך מודולים מוכנים לצורך ביצוע החיבורים). מיקום זה עלול ליצור בעיה בנושא האוורור ויש למצוא את שיווי המשקל בין שתי מערכות אלו.

- אחת מהבעיות הידועות של ניקוז המזגנים היא שמירת שיפוע מספיק על מנת למנוע זרימה חוזרת וטפטוף מי העיבוי אל תוך הקומה בשל כך. כתוצאה מכך צנרת ניקוז המזגנים מטבעה אינה יכולה להיות מובלת אופקית לטווחים ארוכים עקב המרווח המוגבל מעל לתקרות התותב, ולכן יש לשאוף למקם את יחידות המיזוג קרוב ככל שניתן לגרעין המבנה. במקרים שלא ניתן הדבר יש לשאוף ככל שניתן לבצע את ירידות הצנרת בפירים משותפים למספר יחידות (למשל מערכת המנקזת את מי עיבוי המזגנים של שני חדרי מגורים הממוקמים "גב אל גב").



ציור 8.3.1: אפשרויות של חיבורי מערכות בבנייה מודולרית

בנוסף לכך נראה כי מיקום היחידה החיצונית של מזגני האוויר על מעטפת המבנה (בדרך כלל באזור של מרפסות השירות) יוצר בעיה של הובלת הקרר אל יחידה פנימית הממוקמת באופן שבו יהיה צורך לחצות מודול אחד או יותר. אפשרות מוצעת לפתרון זה הוא סלילת הצנרת במרווח שבין תקרת היחידה לרצפת היחידה שמעליה, ובכך הימנעות מהצורך לביצוע חיבורי צנרת המנוגדים לפרקטיקה המקצועית.

בפסקאות הבאות מפורטות הנחיות לתכן ולביצוע של המערכות בנייה מודולרית, כפי שסוכמו מתוך המקורות שנסקרו בסקירת הספרות (Gorgolewski et al. 2005; Monash University 2017; Pan et al. 2008). עקב הקבלת נושאים ממקורות שונים לא צוין המקור של כל אחת מן ההנחיות.

הנחיות לתכן וביצוע של מערכות בבנייה מודולרית

כללי

יש לוודא נגישות למערכות במהלך ביצוע הפרויקט בכל המקומות בהם נדרש חיבור בין המודולים השונים. יש להימנע, ככל האפשר, מן הצורך להיכנס לביצוע עבודות חיבור בין המודולים מתוך המודול עצמו. כלל בסיסי לעמידה במטרה זו הוא מיקום של הפירים האנכיים בגרעין המבנה (הנבנה בשיטה הקונבנציונלית) או בחיבור של המודולים עם גרעין זה. אין לאפשר פירי מערכות בתוך תחום המודול או בהתחברות של שני מודולים.

בנוסף לכך יש לתת את הדעת על הנושאים הבאים:

- (1) עמידות של היחידות המכילות מערכות בטלטולים במהלך ההובלה וההתקנה;
- (2) היחידות המכילות מערכות תידרשנה, בנוסף לעמידה בבקרת איכות טרם עזיבת המפעל, לעמוד בבחינה חוזרת של העמידה בדרישות התקינה והמפרטים לאחר ההרכבה, אך תוך שאיפה להפחית ככל שניתן את העבודה באתר;
- (3) יש להביא בחשבון את סבולות החיבורים של המערכות;
- (4) מספר יחידות תידרשנה להמשכיות (למשל של חיווט וצנרת) בעוד אחרות תידרשנה להפרדה (למשל בידוד תרמי ואקוסטי, איטום);
- (5) על המערכות המותקנות ביחידות להיות חשופות חלקית על מנת לאפשר חיבור עם המערכות של היחידות השכנות;
- (6) יש לוודא איטום מעברי אש, אם בין היחידות או בתוכן, על פי הדרישות.
- (7) יש לוודא בטיחות במהלך ההרכבה, בדגש על נגישות בטוחה לחיבורים הרבים של המערכות בין היחידות.

הוראות למערכות צנרת סניטרית:

סבולות בחיבורים – יש לאפשר תזוזות של 10 ס"מ או יותר.

עמידות של המערכות בתנאי סביבה הכולל

- (1) עמידות בנגיפה;
- (2) עמידות בחשיפה לקרינת השמש;

(3) עמידות בהשפעת של הובלה ימית;

(4) עמידות של המודול וסביבתו מפני חדירת מים כתוצאה של כשל במערכת האינסטלציה.

יש לדאוג לניקוז נאות של המערכות למקרה של כשל בצנרת העלול לקרות במקומות חבויים שאין אליהם גישה במהלך הבנייה או לאחריה.

הוראות למערכות החשמל השונות:

יש לוודא כי היחידות המודולריות יעברו בחינה של המערכות החשמליות לפני עזיבתן את מפעל הייצור. המודול שיסופק יכלול תיעוד של הבדיקות שנעשו במפעל בתוספת מפרט בדיקות שיש לבצע באתר על מנת להשלים את המתקן לקראת בחינתו הסופית. יש להתוות גבולות אחריות ברורים בין היצרן לבין הקבלן המבצע.

במקרה של הבנייה המודולרית ניתן להעביר את החיווט החשמלי בפירים אנכיים במסגרת המודולים או בפיר מרכזי אחד וממנו אופקית בין המודולים. זו החלטה שיש לקבל בשלב מוקדם של התכנון היות שיש לה השפעה על אלמנטים אחרים.

בפרויקטים שבהן יש מנייה נפרדת לכל קבוצת מודולים (כגון בבנייה למגורים) לא יהיה מנוס מהובלה של כבלים מכל אחד מהמודולים אל תוך הפרוזדור הציבורי וממנו חזרה לשטח הפרטי. כתוצאה מכך יעברו בשכנות כבלים המופנים למערכות מנייה שונות ויש לתת תשומת לב מיוחדת לכך.

הוראות למערכות מיזוג אוויר ואוורור:

יש לוודא בקרת איכות מסודרת של המערכות לפני עזיבתן את המפעל. בקרת איכות זו אמורה לכסות, בין היתר, את התחומים הבאים:

(1) מבחן לחץ של הצנרת ותעלות האוורור;

(2) בדיקת הפעלה של הציוד ומערכות הבקרה;

(3) בדיקת הפעלה של כל המערכות, ככל שהדבר מעשי;

(4) בדיקה ויזואלית של החיווט, הן לפני והן אחרי ההובלה;

(5) כל בחינה רלבנטית אחרת כפי שתידרש על ידי יצרן הציוד.

על האלמנטים המסופקים לאתר להיות מלווים בכל התיעוד לגבי בקרת האיכות שנעשתה טרם משלוח היחידות.

יש להגדיר את תחומי האחריות בין היצרן לבין הקבלן המבצע, כאשר כברירת מחדל יצרן המודולים יהיה אחראי למערכת הנמצאת בתוך המודולים בעוד הקבלן באתר ייתן את הכיסוי לכל החיבורים ביניהם. בכל מקרה, בסיכומו של דבר צריך להיות גורם אחד שייקח אחריות כוללת על המערכת, דבר שאמור להיות מוגדר מראש במסמכי החוזה.

כאשר המודולים מיוצרים מחוץ לארץ יש לתת את הדעת על מספר נקודות עיקריות:

(1) עמידה בכל התקנות הרלבנטיות בישראל;

(2) האחריות על אלמנטי מערכת בישראל יכולה להיות קשורה לרכש מספק מקומי ויש להסדיר זאת מראש;

(3) כל החומרים יעמדו בדרישות בטיחות האש הרלבנטיות בישראל;

(4) על כל מערכות השליטה והבקרה לעמוד הדרישות התקנות בישראל.

במידה שהמערכות העיקריות כוללות ציוד, כגון צ'ילרים או מפוחים, יש לוודא כי נערכו הסידורים המתאימים לשם איזון המערכת הכללית ומסירתה. כמו כן יש לוודא אפשרות של חיבור המערכות בין המודולים, כולל הסדרת גישה להרכבה ואחזקה של חלקי המערכת השונים כגון חיבורי צנרת, תעלות, ודמפרי אש במקומות שתוכננו.

8.4 היבטים טכנולוגיים וביצועיים

פרק זה דן בהיבטים טכנולוגיים הקשורים במפעל הייצור של היחידות התלת ממדיות ולאחר מכן בהיבטים הטכנולוגיים של תהליך הביצוע מיציאת היחידות מהמפעל ועד התקנתן בבניין.

8.4.1 אפיון מפעל לייצור יחידות תלת ממדיות

תת-פרק זה עוסק בתיאור מקיף של התשתיות האנושיות והתשתיות הפיזיות בהקמה של מפעל לייצור יחידות מודולריות משלד פלדה. הוא מבוסס ברובו על נכונותו של ד"ר איתן שטרית לחלוק עם צוות המחקר מניסיונו המקצועי רב-השנים בהיבטים השונים של בנייה מודולרית, בעיקר באירופה. הקווים המנחים המוצגים כאן לפי המלצותיו של ד"ר שטרית, אינם בגדר "תורה מסיני" ובעולם קיימים מפעלים המבוססים על תפיסות אחרות גם כן, אבל הם נמצאו מתאימים לצורכי הערכות ראשוניות.

א. תשתיות אנושיות – צוות התכנון חייב להיות מיומן מאוד ובעל ניסיון בתכנון מבני פלדה מפרופילים דקי דופן, בתכנון פרטי גבס, בעל ידע בפרטי איטום והבנה יסודית בפרטי בידוד תרמי, אקוסטיקה ומערכות מכניות, בטכנולוגיה המיוחדת לשיטה הספציפית. הרמה הנדרשת צריכה להיות מותאמת לרמת ייצור במפעל, ולכן נדרשת רמת דיוק גבוהה ביותר על מנת להכין שרטוטי SD המשמשים לייצור בקנ"מ 1:1, 1:2, 1:5 ומקסימום 1:20. הצוות חייב להיות בקי בשימוש בתוכנות מחשב כדוגמת 'סוליד וורקס' SOLID WORKS ו'טקלה' TEKLA. נדרשת בקיאות בשימוש בסביבת עבודה של תוכנת 'רווית' REVIT. השימוש בתוכנת 'רווית' הינו חובה היות ונעשה שימוש בתכנון תלת-ממדי מונחה-עצמים החל מהשלב הראשון, המחייב מיומנות גבוהה בשימוש ברווית במשרדי הקונסטרוקטורים, מתכנני המערכות והאדריכלים. מחויבת גם עבודה בטכנולוגיית BIM לטובת תאום ופלטפורמה אחידה, וחייב להיות אדמיניסטרטור BIM לניהול על מנת להימנע מכאוס תכנוני. מאחר וקיימים אילוצים מאוד משמעותיים בבחירת צוות התכנון, מיקום הצוות התכנוני חייב להיות במפעל הייצור, ולכן הם צריכים להיות שכירים של המפעל, וזאת על מנת לאפשר מתן שרותי תמיכה רציפה לצוות הביצוע והייצור. על מנת לגשר על פערים הנוצרים בין המתכננים ובין אנשי הביצוע והייצור, נדרשת מעורבות גבוהה של מנהלי המפעל, מנהלי הייצור ומנהלי העבודה על מנת לוודא ישימות של כל פרט מתוכנן.

בצוות התכנון יכללו מהנדסי קונסטרוקציה, אדריכלים, ומתכנני מערכות ותפקוד המסוגלים לבצע תאום התכנון למיקום המערכות ותכנון מעברים למערכות מול מהנדסי הקונסטרוקציה והאדריכלים. מתכנן מערכות חיצוני, בסבירות גבוהה, לא ידע לבצע זאת באותה איכות כמו מתכנן של המפעל הבקי בפרטי הייצור.

ב. תשתית פיזית – התשתית הפיזית צריכה לכלול משרדים נאותים לצוות התכנון שיאפשרו מיקום עמדות עבודה לכל עובד, חללים למפגשים וסיעור מוחות, חדרי ישיבות והקרנה. המבנה בו ימוקמו המשרדים יכלול אזור קבלה וקליטה של מבקרים, אזור המתנה להסעה בסוף היום (יום גשום), מקום מוגדר להחתמת כרטיס אלקטרוני, מלתחות עובדים לטובת החלפת בגדים ומקלחת בסוף

יום העבודה, וכמובן – ארונית אחסון אישית, ביגוד מתאים לביצוע העבודות במפעל, קסדת בטיחות, נעלי בטיחות וכיו"ב. בנוסף יהיה אזור הסעדה המאפשר לעובד תנאי אכילה נאותים של כל הארוחות, ולכל המשמרות במהלך היממה, בהתאם לכל כללי משרד הבריאות.

ג. משרדי ההנהלה – משרד מנהל ומזכירת מנהל, חדר דיונים, חדר אירוח לאורחים מהארץ ומחו"ל וקיום כנסים והדרכות. בחדר זה יוצבו פריטים המציגים את הטכנולוגיה להתרשמות האורחים. המיקום יהיה כך שמחדר המנהל ומחדר האירוח, ניתן יהיה להשקיף לעבר קווי הייצור בחלל הייצור, על מנת לאפשר מעקב ולהתרשם מקצב העבודה וכן להמחיש לאורחים את העבודה בקווי הייצור מבלי להפריע לעובדים.

ד. אזור העבודה ומשטחי העבודה – נושא זה דורש ידע ספציפי בתכנון ובניית מפעל. בראש ובראשונה קיימת תלות בתפיסה של שיטת ההרכבה ובמאפייניה, בחומרים שמהם מבוצעת ההרכבה, בגודל המינימלי והמקסימאלי של הרכיבים המגיעים להרכבה בקווי הייצור וברמת הגימור שלהם. נדרש לתכנן את גודל הרכיבים שמגיעים מוכנים להתקנה ממפעלי עזר של קבלני משנה בהתאם למשימות המבוצעות בכל תחנת עבודה וקצב הייצור.

עבור יחידות בבנייה קלה, בהן השלד מפלדה, הגמר הפנימי מלוחות גבס, והמעטפת מלוחות קלים עם השלמה של חיפוי חיצוני קשיח, יש לתת תשומת לב לטיפול בפלדה בכל היבטי הקורוזיה, גלבון והגנה בפני אש. טיפול כזה בפלדה אפשר שיתבצע במפעל ואז יידרש בעבורו אזור וציוד המיועדים לכך. ניתן גם לייצר את הרכיבים המגולוונים במפעל חיצוני ולהביאם מוכנים, או לבצעם במפעל במבנה סמוך למבנה הייצור. אסור לקיים פעילות כזו במקום פתוח מטעמי בריאות וגרות העובדים ותקנות העבודה. גודל האלמנט הבסיסי יכול להיות ברמת פרופיל או קיט של אלמנטים מוכנים להתקנה בקווי הייצור.

התפיסה של שיטת ההרכבה בקווי הייצור תכתיב את האפשרות לשלב אלמנטים דו-ממדיים או תלת-ממדיים ואת גודלם הפיסי ומשקלם. כך ייקבע האם האלמנטים יורכבו טרם הגעתם במפעל המספק אותם לרמה דו-ממדית או תלת-ממדית, או יגיעו ברכיבים קטנים יותר. כל זה משפיע על מצבת כוח האדם וכמות העובדים הנדרשים בקווי הייצור, מיומנותם, כמו גם התשתיות הפיסיות לאחסון ולשינוע.

ה. שיטת החיבור של האלמנטים – ניתן לבצע את העבודות לחיבור האלמנטים בריתוך או בהברגה (כבר לא מקובל לבצע כיום חיבור על ידי מסמרות). הציוד הנדרש לכל טכנולוגיה הוא שונה, ומשפיע על היכולת לספוג סטיות ברמת טולרנטיות שונה, הנדרשת להגדרה מראש בשלבי התכנון, היות וקיימת השפעה על העבודה בפסי הייצור.

ו. רחבת הכניסה לאזור הייצור חייבת להיות מתאימה לקליטה של הרכיבים המגיעים. נדרש להגדיר רחבת קליטה של רכיבים, אשר בה מתקיים תהליך קבלת המוצרים המגיעים מספקי משנה ומבוצעת בקרת איכות למוצרים עוד לפני קליטתם במפעל (למניעת קליטת מוצר לקוי). ניתן לבצע חלק מתהליך בקרת האיכות גם על ידי צוותים מיומנים של המפעל אצל ספקי המשנה בטרם תבוצע האספקה למפעל.

ז. שטח העבודה מוגדר כאזור בו יש סדנאות ייצור קטנות, כגון: נגריה, מסגריה וסדנא לעבודות אלומיניום. תחנות עבודה אלו תומכות בקווי הייצור וממוקמות בסמוך לאזור הכניסה של רכיבים ממחסן הציוד אל קווי הייצור על מנת לא להפריע למהלך הייצור. במידה ומבוצעת במפעל הרכבה של מספר רכיבים דו ממדיים (פאות המבנה) למערכת של מבנה תלת ממדי, נדרשות במות עבודה, אמצעי הרמה ומנופים לשינוע על מנת למנוע צורך בהתכופות של העובדים אל הרצפה מטעמי בריאות תעסוקתית, וגם למנוע גרימת נזק לרכיב עצמו בגלל עבודה לא-נוחה. הנפה ושינוע המוצרים על ידי מכונות רובוטיות, או רובוטיות למחצה, מסייעים רבות ליעול הייצור, ומונעים פגיעה במוצר ובבריאות העובדים.

ח. אחסון עבור תחנות עבודה – הרכבת שלד הפאות של היחידה התלת-ממדית היא תחנת עבודה ראשונה שלאחריה יחל תהליך הייצור הלינארי של קו הייצור. ניתן להזמין את המבנה התלת-ממדי בשלמותו, או בחלקים דו-ממדיים ממפעל עזר, ובכך לוותר על שלב זה.

במהלך הייצור מחולקים העובדים לתחנות עבודה בהתאם לסוג העבודה וההספק הנדרש בכל תחנה. לכל תחנת עבודה מוקצה מחסן ייעודי בסמוך לקו הייצור, הכולל חלקים, חומרים ורכיבים הנדרשים באותה תחנת עבודה. המחסן יצויד מחדש בכל סוף של יום עבודה/משמרת לקראת יום העבודה/המשמרת הבאה. פעילות המילוי מחדש השוטפת של המחסן, אינה מבוצעת בזמן עבודות הייצור על-מנת לאפשר יעילות בהעברת החומרים והרכיבים השונים. משימת המילוי מחדש היא משימה של העברה כפולה (double handling) מתוכננת, המייעלת את שלבי הייצור. בנוסף למחסנים הקטנים, המיועדים בעבור תחנות העבודה לאורך קווי הייצור, יהיו גם מחסנים גדולים יותר בסמוך למבנה הייצור, בהם יאוחסנו החומרים והרכיבים המגיעים אל המפעל מספקי משנה, כך שתתאפשר עבודה רצופה של חודש ימים, לפחות, בקווי הייצור. ניהול האספקה השוטפת יהיה בשיטת FIFO (First In – First Out).

ט. מערך הלוגיסטיקה נדרש לתת מענה להצטיידות ומילוי המחסנים, כך שלא יחסרו פריטים הנדרשים לשמור על ייצור רציף בקווי הייצור. יחד עם זאת, בכל מקרה נדרשת תמיכה ראויה של קבלני משנה וספקים חיצוניים אמינים.

י. תכנון תחנות העבודה בקווי הייצור מתבצע מתוך ניתוח רצף העבודות הכולל הקיים לייצור כל אחת מהיחידות. מומלץ להפריד ייצור של יחידות המכילות "אזורים רטובים" (מטבח, מקלחות, שירותים) לקווים נפרדים מאלה שמיוצרות בהם יחידות שאינן כוללות אזורים רטובים. יחידה הדורשת עבודות איטום, או עבודות רטובות של ריצוף והדבקה, דורשת בד"כ גם זמני התקנה וייבוש ארוכים יחסית, ומוטב שלא לטלטל את היחידה הטרייה במשך יום-יומיים. אם נדרש לייצר יחידה שהיא יבשה מעיקרה, אבל צריך לשלב בה אלמנט רטוב קטן, אזי, על מנת להימנע מעיכוב בשלבי הייצור, ניתן להתקין בה מכלול מוגמר של האלמנט הרטוב שהוכן מראש בעמדת עזר לפני ימים אחדים, וכבר הספיק להתייבש.

יא. בקרת איכות – בסוף תהליך ההרכבה, המחולק על פני 9 עד 11 תחנות, לערך, מבוצעת בקרת איכות מקומית בכל תחנה, וקיים מנהל בקרת איכות החותם על היחידה בטרם תועבר לתחנה הבאה. מערכת ניהול האיכות של המפעל מוודאת שמבוצע תהליך בקרת איכות מקומי בכל תחנה, וכן שמבוצעות הבדיקות הראשיות בסוף קו הייצור בטרם תועבר היחידה לעטיפה ולאחסון ביניים עד למועד השילוח ללקוח.

יב. שטח המפעל מתוכנן באופן מודולרי עם יכולת להרחבה והגדלה של מספר קווי הייצור ואזורי התמך שלהם בהתאם לסוג קו הייצור – קו רטוב או יבש (ראה שרטוט עקרוני). שטח המפעל יכולול שטחים, המיועדים לאחסון זמני של המודולים המוכנים והארוזים לקראת משלוח לאתר ההקמה, בכמות הנאמדת לייצור חודשי. סה"כ נדרשים לכך כ- 2,500-3,000 מ"ר. השטח יהיה מקורה, והוא עשוי להכיל כ- 160 יחידות הנערמות זו על גבי זו עד לגובה של 3 יחידות. בשטח האחסון יוצב עגורן שער שסייע בשינוע היחידות.

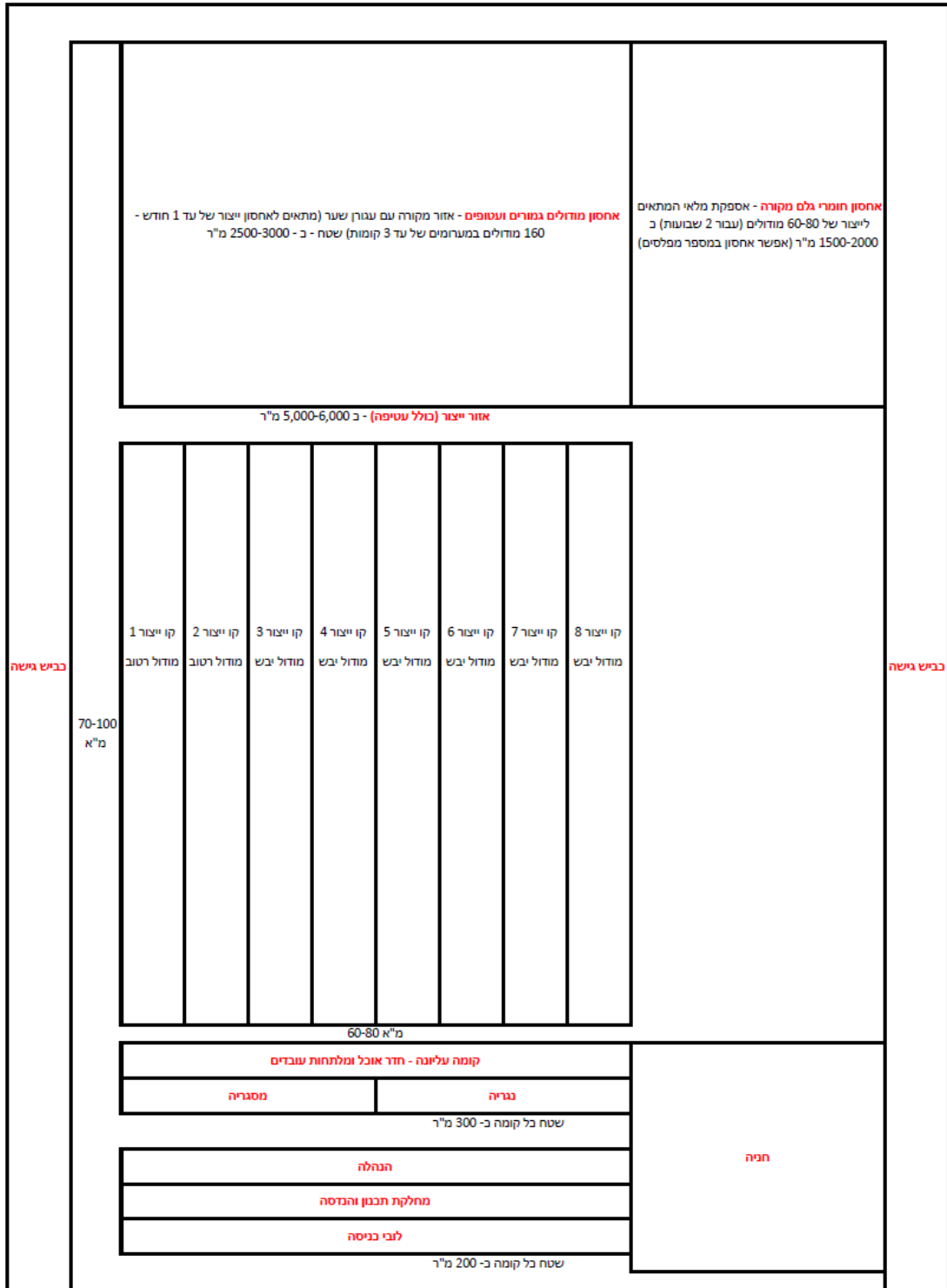
שטח אחסון חומרי הגלם יהיה מקורה, אף הוא, ומידותיו כ- 1,500-2,000 מ"ר. אחסון חומרי הגלם מתאפשר באחסון לגובה על מידוף מתאים והגישה למדפים באמצעות מלגזה. במחסן יהיו חומרי גלם המתאימים לייצור במשך 14 ימים, בממוצע, בעבור קווי הייצור השונים, בהתאם לתוכנית העבודה. ניתן לאחסן בשטח אלמנטים דו-ממדיים, תלת-ממדיים ורכיבים קטנים יותר. קווי הייצור יהיו זה לצד זה. רוחבם כ- 6-8 מ' ואורכם כ- 70-100 מ'. הממדים ייקבעו בהתאם למספר תחנות הייצור בכל קו וסוגי היחידות הנבנים בהם. יישמר מרחק בטיחות בין הקווים בהתאם לנדרש משיקולי בטיחות בעבודה ומשיקולי נוחות ויעילות בעבודה.

באזור הסמוך לקווי הייצור יהיה מבנה בן 2 קומות: בקומה התחתונה ימוקמו סדנאות להכנת פרטי מסגרות ונגרות, כל אחת בשטח של כ- 150 מ"ר, וכן חדרי שירותים לעובדים. בקומה העליונה ימוקמו חדר האוכל והמלתחות של העובדים במפעל. שטח הקומה כ- 300 מ"ר. בסמוך יהיה מבנה ההנהלה והתכנון ההנדסי. קומת הקרקע של המבנה תכלול את לובי הכניסה, אזור ההמתנה של העובדים להסעה, מיקום מכשיר החתמת כרטיס עובד ועמדת קבלה וביטחון. שטח הקומה כ- 200 מ"ר.

בקומה הראשונה ימוקמו משרדי התכנון ההנדסי, התכנון האדריכלי, חדרי ההדרכה וחדרי הישיבות המיועדים לצוות התכנון. שטח הקומה כ- 200 מ"ר. בקומה השנייה ימוקמו משרדי ההנהלה והמזכירות, חדרי הישיבות והאירוח של המפעל. שטח הקומה כ- 200 מ"ר.

דוגמה של תוכנית מפעל נתונה בציר 8.4.1.

יג. ניהול הלוגיסטיקה מן הספקים אל המפעל ומהמפעל אל אתרי הבנייה – במפעל יהיה מנהל לוגיסטי הממונה על תאום הרכש של חומרי הגלם מספקים וקבלני משנה ועל תזמון אספקתם של חומרי הגלם למפעל בהתאם לקצב התקדמות הייצור. הרכש יהיה מתואם עם מחלקת התכנון ומחסן חומרי הגלם. מחסן חומרי הגלם יעביר מדי יום חומרי גלם אל המחסנים של קווי הייצור בהתאם לצורך לפי נוהל 'מלא מחדש' שיגדיר את הרכיבים הנדרשים לכל קו ייצור.



סה"כ כ 20 דונם

ציור 8.4.1: הדגמה של תוכנית מפעל לייצור יחידות תלת ממדיות עבור בנייה מודולרית

לכל פרויקט שבעבורו מיוצרות יחידות, ימונה במפעל צוות בראשות מנהל פרויקט אשר באחריותו לתכנן ולנהל את לוחות הזמנים של תכנון הפרויקט, אישורו, ייצור היחידות ומועדי אספקתן לאתר

ההקמה. הצוות יתכנן את מרווחי הזמן ממועד הייצור ועד למועד שיגור היחידות במשלוחים ללקוח, כך שיחידות לא יאוחסנו במפעל יותר מחודש ימים.

במידה והמשלוח יוצא ביבשה (קיימת גם אפשרות לייצא לחו"ל באוניות בקיבולת של כ- 70-100 יחידות למשלוח), ניתן לתכנן שיירה של כ- 6-10 משאיות מדי יום לאתרים השונים. מספר היחידות בכל משלוח יהיה בהתאם ליכולת האתר לקלוט אותן להתקנה.

ד. מחזור פסולת במפעל, בנייה ירוקה, השלכות סביבתיות – המפעל, באמצעות תכנון מדויק ויעיל, מסוגל לייצר יחידות כאשר הפחת של חומרי הגלם אינו עולה על כ- 3%. הקטנת הפחת מאפשרת חיסכון כספי של עלויות הייצור, הקטנת כמות החומרים הנדרשים למחזור וכן הקטנת שטחי האחסון של חומרי הגלם והפסולת. כמו כן, שימוש בחומרי גלם הניתנים למחזור מלא מאפשר שימוש חוזר כמעט בכל פחת החומרים שנוצר בתהליכי הייצור.

הובלת יחידות מוגמרות לחלוטין (כולל עבודות גימור בתוך היחידה) אל האתר והרכבתן באתר, מאפשרת הפחתת תנועת משאיות רבות אל האתר שכן כמות חומרי הגלם ופינוי הפסולת באתר מופחתות באופן משמעותי.

8.4.2 ארגון אתר, שינוע, לוגיסטיקה

א. התאמת ציוד הנפה

האתגר המקצועי העיקרי שטכנולוגית הבנייה מודולרית, המבוססת על ביצוע באתר מיחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, מעמידה בפני אתר הבנייה כרוך בהבאה של אלמנטים גדולי מידות וכבדים לאתר הבנייה, הנפתם, והצבתם במבנה.

הרשות למבנים ובנייה בסינגפור (Building and Construction Authority) מבחינה בין שני סוגים עיקריים של אלמנטים מודולריים – אלמנטים העשויים על בסיס בטון ואלמנטים העשויים על בסיס פלדה (כפי שתואר בפרק 5, כאשר יחידה מוגדרת כעשויה מבטון רק הרצפה ושני קירות האורך או חלק מהם יצוקים מבטון, בעוד שהתקרה ויתר חלקי הקירות עשויים מפתרונות קלים עם רכיבי פלדה וסגירות מלוחות גבס, אלומיניום וכד'). המשקל האופייני של אלמנט הבטון מוגדר בין 20 ל- 35 טון וזה של אלמנט הפלדה מוגדר בין 15 ל- 20 טון.

הרשות אף מגדירה את סוגי הציוד הדרושים להנפה על פי סוגי העגורן מול טווח משקלים של מודול, גובה ההנפה הנדרש, ורדיוס ההנפה הנדרש (ציור 8.4.2). ניתן לראות מהשוואה זו כי בבנייה לגובה הפתרון המתבקש יהיה עגורן צריח או עגורן זחלי.

מספר מקרי בוחן המפורטים במחקר זה מציינים במפורש את הציוד ששימש להנפת האלמנטים למקומם במבנה. Gardiner (2015), תיאר את מהלך הקמתו של בניין SOHO בדרווין, אוסטרליה. בפרויקט זה ניבנו 21 קומות מודולריות על גבי 8 קומות חניון על קרקעי, כך שמספר הקומות בבניין הוא 29. המחבר תיאר את השאיפה להגיע למשקל נמוך של האלמנטים, שלאחר הורדת המשקל

המרחבי של הבטון ברצפה הגיעו לכ- 22 טון. העגורן ששימש להנפות היה עגורן צריח "של 65 טון". במאמר לא מצוינים מרחקים מדויקים אך על פי התרשימים במאמר ניתן להעריך את טווח ההנפה המרבי הדרוש בכ- 40 מ'. במלון Citizen M בלונדון (MODCONS Case Studies), מבנה בן 5 קומות מעל קומה מסחרית בסביבה אורבנית צפופה, הגיעו היחידות למשקל של כ- 10 טון. נעשה שימוש בעגורן מתנייע 500 טון בעל זרוע של 50 מ', שהוצב על הכביש (MODCONS Case Studies). בפרויקט Wembley בלונדון, שבו הוקמו מעונות סטודנטים במבנה בן 17 קומות, הגיע משקל היחידה לכ- 12 טון. האלמנטים הונפו על ידי עגורן מתנייע 200 טון שהוצב לצד הכביש. במעונות הסטודנטים של אוניברסיטת Wolverhampton (MODCONS Case Studies), המבנה הגבוה ביותר הוא בן 25 קומות. הנפת היחידות למבנה זה בוצעה על ידי עגורן צריח "הגבוה" (הגדול?) ביותר בבריטניה, המסוגל להניף 30 טון ברדיוס של 20 מ'. ניתן להיווכח כי במקרה הקיצוני ביותר – מגדל SOHO, נדרש שימוש בעגורן צריח. טבלה 8.4.1 כוללת ריכוז המידע לצורך התרשמות השוואתית איכותנית בין הפרויקטים שצוינו.

Characteristic of Crane	Tower crane	Mobile crane	Crawler crane
Crane Capacity	50 tons	700 tons	500 tons
Lifting Capacity	25 tons – 40 tons	25 tons – 40 tons	25 tons – 40 tons
Height of Equipment	120m	40m	80m
Radius of work	40m	40m	40m

ציור 8.4.2: סוגי העגורנים אל מול דרישות ההנפה של יחידות מודולריות

(Building and Construction Authority)

ב. לוגיסטיקה – מהמפעל ועד רחבת ההנפה באתר

ב.1 הובלות

מידותיהן של היחידות התלת ממדיות מעמידות בפני המבצעים אתגרים בנושא הובלתן מהמפעל ועד לרחבת הפריקה באתר. התקנות בארץ [תקנות התעבורה 85 (ג)] מכתיבות מגבלות על רוחב המטען המובל בכבישים כדלקמן:

1. כאשר רוחב המטען הוא מעל 2.50 מ' ועד 3.40 מטרים ישנן הנחיות בנוגע לרכב המוביל והשילוט שעליו לשאת, אך אין דרישה לליווי כלשהו (סעיף קטן 1).

2. כאשר רוחב המטען הוא מעל 3.40 מטרים ישנן הוראות בדבר ליווי הרכב המוביל וכן דרוש "היתר מיוחד של קצין משטרה ובהתאם לתנאי ההיתר" (סעיפים קטנים 2 ו-3).

טבלה 8.4.1: השוואה של נתוני פרויקטים ופתרונות הנפה בפרויקטים של בנייה מודולרית

פרויקט	משקל אלמנט טיפוסי (טון)	מספר קומות	טווח הנפה מקסימאלי (מ')	אפיון העגורן
SOHO, דרווין, אוסטרליה	22	29	40	עגורן צריח 65 טון
Citizen M, לונדון, בריטניה	10	5	לא צוין	עגורן מתנייע 500 טון, זרוע 50 מ'
Wembley, לונדון, בריטניה	12	17	לא צוין	עגורן מתנייע 200 טון
Wolverhampton, לונדון, בריטניה	לא צוין	25	לא צוין	עגורן צריח, 30 טון ל-20 מ'

יוצא מכך שיש להגביל את רוחבן של היחידות המובלות (כולל העטיפות) ל-3.40 מטרים על מנת לא להזדקק לסידורים מיוחדים בנושא הובלת היחידות בכבישים. יש לציין כי ניתן, במקרים מיוחדים, לבצע יחידות רחבות יותר אך יש להביא בחשבון תוספת עלות כתוצאה של תיאום היתרי הובלה וכן עלותה של העמידה בתנאים שלהם.

בנוסף לכך ישנה אף הגבלה לגבי גובה היחידות המובלות [4.80 מטרים מפני המיסעה (האספלט) ועד החלק הגבוה ביותר של המטען, תקנה 85 (ד)], ואורכן [עד 20 מטרים, תקנה 85 (ה)], אך ניתן להניח כי מידות אלו אינן מהוות מגבלה על ממדי היחידות המודולריות בבנייה למגורים.

מגבלה נוספת בנושא ההובלות לאתר היא הסביבה האורבנית בה יתוכננו וייבנו המבנים. יש לבחון ביסודיות את האפשרות להגיע עד לאתר עם משאיות ההובלה, כולל דרכים צרות ופניות. יש להניח כי ברוב המקרים מגבלה זו תחול על מרכזי הערים ותפנה את הפרויקטים בבנייה מודולרית של בניינים גבוהים ורבי קומות לשוליהן.

ב.2 אחסון ביניים

הדרישה לאחסון ביניים תופיע במקרה של חוסר התאמה בין תאריך אספקת היחידות מהמפעל לבין התאריך בו הן תידרשנה באתר. ניתן להניח כי, ברובם המכריע של אתרי הבנייה, לא תהיה אפשרות לאחסון יחידות מודולריות, ולכן האספקה לאתר תתואם כך שתהיה בדיוק בתאריך הדרוש להרכבה (just-in-time delivery). חוסר התאמה זה צפוי במקרה של גמר ייצור היחידות המודולריות לפני מועד הדרישה בפועל (במקרה של ייצור בארץ), או אספקתן בכמות מעל יכולת ההרכבה היומית

(במקרה של ייבוא יחידות מחו"ל, שבמסגרתו יפרקו יחידות מודולריות רבות בנמל ויידרש להוציאן ולא לשלם דמי אחסנה גבוהים). מאליו מובן שאחסון ביניים, במידה שיידרש, יטיל עלות נוספת על הפרויקט.

נושא זה של אחסון ביניים מוכר גם בסינגפור. Huang ואחרים (2018) מתארים בעיה זו כאילוץ שיש להתגבר עליו במסגרת הפרויקטים בבנייה מודולרית בסינגפור, שהיחידות עבורם מיוצרות בארבעה מקומות שונים כולל מלזיה, טאיוואן, וסין. כתוצאה מכך הוכשר בסינגפור אתר לאחסון זמני (שמידותיו אינן מצוינות), ובאתר זה אף בוצעה ביקורת של היחידות לווידוא עמידתן בדרישות המפרט. Mo ואחרים (2018) מציינים אף הם את הצורך באחסון ביניים של יחידות מודולריות המיוצרות מחוץ לסינגפור ומובלות לאתר אחסון ביניים בסינגפור שבו הן אף עוברות השלמות גימור (fitting-out) לפני הובלתן לאתר הבנייה.

ב.3 הרכבה באתר

כפי שצוין לעיל, אתר הבנייה של מבנים רבי קומות למגורים מתאפיין ברוב המקרים בסביבה צפופה המטילה מגבלות על אפשרות האחסון באתר. בנוסף לכך, יש להכשיר דרך גישה למשאיות המובילות את היחידות עד לרחבת הפריקה בתחום ההגעה של העגורן המניף. בנוסף לכך יש לשמר מיקום לפריקת מספר קטן של יחידות (להחלטת הנהלת האתר על פי ניסיון) לצורך פריקה של יחידות במקרה של תקלות.

ב.4 כוח אדם באתר הבנייה

במקביל למועד בו מיוצרים המודולים במפעל, נדרש לבצע עבודות תשתית והכנה לקליטת המודולים באתר על ידי קבלן ייעודי.

קבלן זה יבצע בינוי שלד המבנה בבטון ופלדה, יבצע את יסודות המבנה, בינוי הפירים (מעליות, מדרגות, ממ"קים ועוד).

כמו כן יבוצעו כל התשתיות הנדרשות שאליהן יתחברו מערכות אלקטרומכניות המותקנות במודולים (חשמל, מים, ביוב, מתזים, מיזוג אויר וכו')

צוות ההקמה של הפרויקט יהיה צוות ייעודי למשימתו ורב תכליתי, כך שיינתן מענה לשלבי הביצוע השונים.

צוותי העבודה יהיו מחולקים ל 3 קבוצות ראשיות, כאשר לכל קבוצה תהיה התמחות לביצוע משימותיה. הרכב הצוותים הוא בדרך כלל כלהלן:

1. צוות לביצוע הצבת המודולים – מורכב מ- 8 אנשי צוות, כאשר אחד מהם הוא ראש הצוות. ראש הצוות אחראי לקשר הישיר עם מפעיל העגורן שבאמצעותו תתבצע ההתקנה. הצוות עשוי להציב ביום עבודה 6-10 מודולים כתלות בממדים של המודול ובגובה ההתקנה (הקומה).

2. צוות לביצוע עבודות גמר בתוך המבנה – מורכב משתי קבוצות מקצועיות. לשני הצוותים יהיה מנהל אחד.

הצוות עשוי לבצע גימור מושלם של 1-2 דירות ביום כתלות בשטח הדירה וברמת פרטי הגימור הנדרשים.

א. קבוצה של 4 אנשי צוות

עובדים אלה צריכים לעבור הכשרה לביצוע כל משימות הגימור הפנימי (ריצוף חיפוי, גבס וצבע, פרקט ושטיחים, חיפויים, סגירת מעברים) סגירה וחיבור הממשקים שבין המודולים השונים, כולל מעברי אש, בהתאם לתוכנית ופרטי הגמר השונים.

ב. קבוצה של 6 אנשי מקצוע בתחומי החשמל, האינסטלציה ומיזוג האוויר (3 זוגות). קבוצה זו נותנת מענה לכל החיבורים וההפעלות של המערכות השונות בבניין.

באם יש מערכות ייחודיות נוספות בבניין, מותאם צוות טכני נוסף המתמחה במערכת זו.

3. צוות לביצוע עבודות גמר חזיתות וגג – מורכב מ-4 עובדים (2 זוגות)

הצוות יוכשר לבצע התקנת קירות מסך, חיפויי חוץ וביצוע איטום.

ניתן להגדיל את היקף הצוותים בהתאם לתפוקות הנדרשות, התשומות ולוח הזמנים הדרוש.

שלושת הצוותים יכולים לעבוד במקביל מיידית לאחר כיומיים של העמדה והרכבה של מודולים.

הכשרת העובדים יכולה להתקיים במפעל היצרן או אצל הקבלן המבצע.

בפרויקט גדול ו/או כאשר העבודה מתקיימת במדינה בה כוח העבודה זול יותר מזה של בעל המפעל, הקבלן הראשי (המתקין את המודולים ומבצע את עבודות הגימור) ישלח עובדים שלו אל היצרן להשתלמות על אופן ביצוע העבודות והכרת פרטי הביצוע.

לאחר ההכשרה, צוות מצומצם של היצרן ילווה את העובדים של הקבלן הראשי בעת ההתקנה להשגחה ומתן פתרונות.

רוב ההתקנה נעשית אומנם בקווי הייצור במפעל, אך באחריות היצרן להכין קורס הכשרה לעובדים שיעסקו בעבודות ההשלמה באתר.

באחריות היצרן להציג ולאשר מראש עם הקבלן המבצע תוכניות ייצור והרכבה כולל פרטי הביצוע לחיבור הממשקים והחומרים בהם נעשה שימוש, כל זאת על מנת לתאם ולאפשר הכשרת העובדים בביצוע המשימה.

בישראל, היות והיקף הביצוע יהיה מוגבל בשלב ראשון, יתכן וצוותי הביצוע יהיו של המפעל המייצר שיבצע את תכנון הייצור, ייצר את המודולים וגם יתקין ויבצע את כלל עבודות ההשלמה באתר.

8.4.3 מראי מקום

- Building and Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Prefabricated Prefinished Volumetric Construction". Building and Construction Authority, Singapore.
- Gardiner, P. (2015). "The construction of a high-rise development using volumetric modular methodology," *proceeding of the CTBUH 2015 international conference*, Wood, A. and Gabel, J. Eds. Now York, 136–143.
- Huang, B. G., Shan, M., and Looi, K. Y. (2018). "Key constraints and mitigation strategies for prefabricated prefinished volumetric construction", *Journal of Cleaner Production*, 183, 183–193.
- Mo, H. K., Peng, J. P., and Shea, M. (2018) "Pre-fabricated pre-finished modular construction (PPVC) for residential projects, Threesixty Cost Management Pte Ltd. MODCONS Case Studies. FP7-SME-2012-1 GRANT AGREEMENT N° 315271 MODCONS DEVELOPMENT OF MODULAR CONSTRUCTION SYSTEMS FOR HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS.

8.5 היבטי ניהול הבנייה

פרק זה מציג היבטים של ניהול הבנייה הנוגעים באופן מיוחד לבנייה מודולרית עם יחידות תלת-ממדיות מוגמרות במפעל (ובקיצור בנייה מודולרית).

להלן יידונו בפרוטרוט הנושאים הבאים:

1. שרשרת האספקה הטורית של בנייה קונבנציונלית,
2. שרשרת האספקה הטורית של בנייה מודולרית,
3. ניהול סימולטני של העבודות באתר והייצור במפעל,
4. ניהול האיכות,
5. ניהול הבטיחות.

8.5.1 שרשרת האספקה הטורית של בנייה קונבנציונלית

בבנייה קונבנציונלית, התהליך הוא בעיקרו טורי, כדלהלן:

- א. תחילה עוסק היזם ("בעל המאה") בתכנון וברישוי, לרבות בדיקות ייתכנות ובדיקות כדאיות.
- ב. אח"כ, הוא מעסיק בעלי מקצוע נוספים בתכן מפורט, בהכנת מסמכי המכרז, בהכנת התקציב, ובביצוע המכרז, בד"כ – עם מסמכים "לא בשלים".
- ג. לאחר הכרזת הזוכה: מחתימים אותו על מסמכים משפטיים; לוקחים ממנו ערבויות ובטחונות; ומעבירים לידיהם את האחריות לביצוע.
- ד. במהלך הביצוע, "נזכרים" בכל מיני חסרים ופערים, ו"משגעים" את הקבלן עם הוראות לשינויים, ותוך כדי כך – נותנים לו את ההזדמנויות לכל מיני דרישות משלו.
- ה. תוך כדי כך, נוצרות למכביר עילות לתביעות הדדיות ולחיכוכים, שלא יפתרו בד"כ במשך שנים ארוכות.
- ו. באופן כרוני, ככלל ולא כיוצא מן הכלל, הפרויקטים מסתיימים עם חריגות משמעותיות בתקציב, בל"ז ובאיכות.

בנייה מודולרית אמורה להיטיב לא-רק עם טיב המוצר הסופי, אלא גם עם התהליך! מעצם טיבה וטבעה, בנייה בטכנולוגיה זו מחייבת מסמכי מכרז בשלים הרבה יותר. הצדדים חייבים להסכים מראש על דגמים ספציפיים של יחידות מודולריות על כל תכולתן, עם דוגמאות פיזיות קיימות. אחרי התנסויות אחדות בסגנון בנייה כזה, העניינים כבר "זורמים" הרבה יותר על מי מנוחות, עם פחות הפתעות ופחות עילות לחיכוכים. כאשר חותמים הצדדים על ההסכם, הם יודעים די במדויק מה הם צריכים לתת, מה הם צריכים לקבל ומתי. הסיכויים לחריגות ולאי-הבנות קטנים בצורה משמעותית. על-כן, כאמור, בנייה מודולרית מקטינה את רמת האי-וודאות לא רק לגבי המוצר שיתקבל, אלא גם לגבי תהליך קבלתו – בזמן המוסכם, במחיר המוסכם ובאיכות המוסכמת.

פרויקטים של בנייה מודולרית צפויים להביא בשורה לענף הבנייה הישראלי לא-רק במובנים של מהירות הבנייה ואיכות המוצר, אלא גם, ואולי בעיקר, בהגברת האמינות ורמת הוודאות בענף הסובל ממוניטין גרוע של אי-וודאות ואי-אמינות (Han et al, 2012, Lee et al. 2017).

8.5.2 שרשרת האספקה של בנייה מודולרית

בבנייה קונבנציונלית, כאמור, התהליך הוא בעיקרו טורי. כדי להתחיל בבניית הקומות הטיפוסיות של בניין מגורים בשיטה הקונבנציונלית, חייבים להמתין לסיום של המבנה התחתון הנושא אותן (דיפון, ביסוס, קומות תת-קרקעיות, קומות/ות לובי ושרות). בבנייה מודולרית, לעומת זאת, אפשר לעבוד ממש במקביל: בעת שעובדים באתר על המבנה התחתון, מייצרים במפעל את היחידות המודולריות המוגמרות בתזמון המתאים ובקצב המתאים. כל זה נעשה, כמובן, כ"סוף מעשה במחשבה תחילה" בתיאום (מושלם ככל האפשר) של מנהלי הפרויקט בכללותו, ושל המנהלים של כל תת-פרויקט, בפני עצמו (הכוללים בעיקר: ייצור במפעל, הכנת מבנה תחתון ומרכיבי שלד הנבנים באתר, הובלות, הרכבות באתר, השלמות באתר). כל תת-פרויקט כזה מהווה אמנם אופרציה בפני עצמה, אבל הוא מוגדר היטב, הוא תחום במקום ובזמן, עוסק בו צוות ייעודי ומקצועי המכיר היטב את מלאכתו, תחומי האחריות ברורים לכל המעורבים והממשקים מטופלים בצורה שיטתית ובמשנה תשומת-לב. בנוסף לכך, כל התהליכים מלווים בהבטחת איכות ובטיחות בצורה צמודה.

חלק ניכר מן היחידות המודולריות המיוצרות במפעל יגיעו לאתר בדיוק בזמן הנכון להרכבתן היישר מן המשאית אל מקומן הסופי בבניין (Just In Time). יחידות אחרות ימתינו מעט, בצורה מתוכננת מראש, באחסון ביניים במפעל, באתר, או במקום אחר שהוכן לכך בעוד מועד. המתנה כזו מצריכה אמנם "טיפול כפול" (double handling), אבל, לפעמים זה "הרע במיעוטו". כך או כך, חשוב לזכור שקצב ההרכבה באתר הוא מהיר מאוד. על ידי עגרון אחד מרכיבים כשש עד עשר יחידות מודולריות ליום עבודה (Rogan et al., 2000), היינו: עבור בנייה עם יחידות מודולריות גדולות מפלדה, 2 עד 3 דירות ליום עבודה. כל יתר הפעולות המשלימות, חייבות, אפוא, "להתיישר" עם קצב ההרכבה, כדי שבסופו של דבר, יכתב ההספק היומי על-ידי צוות ההרכבה היקר, ולא על ידי צוותים זולים של העבודות המשלימות כגון איטום מישקים, וחיבורי צנרת. כמובן, צריך יהיה לתת דגש חזק וקדימות ליעול מיטבי של עבודת הצוות היקר והקריטי של הרכבת המודולים.

שרשרת האספקה בבנייה המודולרית קצרה, ברורה וגם וודאית הרבה יותר:

- א. היזם בחר מראש להקים את הפרויקט שלו בבנייה מודולרית,
- ב. היזם ואנשיו כבר ראו ובחנו ביסודיות כמה וכמה פרויקטים גמורים "חיים" כאלה,
- ג. הם כבר התלבטו והתדיינו ביניהם, והגיעו להבנות מה בדיוק הם רוצים לפרויקט החדש,
- ד. כאשר ייחתמו ההסכמים, הכל (כמעט) יהיה נהיר וברור ו"סגור", ומקובל על כל המעורבים,
- ה. מסמכי התכנון והרישוי יכללו בעיקר אינטגרציה של מסמכים קיימים (עם התאמות מסוימות),
- ו. תהליכי הרישוי יהיו קצרים יותר, כי חלק גדול ממרכיבי הרישוי כבר מאושרים מראש,

- ז. אפשר להתחיל מהר מאד את העבודות באתר על המבנה התחתון (שגם רישויו מהיר),
 ח. במקביל, יחלו עבודות הייצור הסדרתי במפעל בקצב המתוכנן ובתנאי וודאות גבוהים,
 ט. לא יהיו כמעט שום שינויים או הפתעות בדרך, ולכן גם לא תהיינה עילות לחיכוכים,
 י. הפרויקט יסתיים כמתוכנן – בזמן המוסכם, בתקציב המוסכם ובאיכויות המוסכמות.

יתר-על-כן, הואיל ומדובר בתהליכים שהם לוגיסטיים בעיקרם, אפשר וראוי לרתום לטובתם את הכלים המתאימים המשוכללים ביותר הקיימים בשוק. הדבר נכון במיוחד ביחס לתהליכי הייצור, אבל מתאים גם לתהליכי ההרכבה, התובלה, האחסנה, ניהול האיכות וכו'. מבחינה זו בנייה מדולרית מייצרת הזדמנות של ממש ליישם חלק משיטות הייצור (אשר דומים למפעלי יצר של מרכבי אוטובוסים או קרונות של רכבת), התכן והבקרה המתקדמות כמו BIM ו-LEAN יחד עם כלי סימולציה והמחשה מתקדמים בפרויקטי בנייה סדרתיים. הדבר נכון בוודאי לגבי מפעלי הייצור, אבל נכון גם – לגבי אתרי הבנייה (Olearczyk et al., 2012, Moghadam et al., 2012a, 2012b, Yu et al. 2013).

8.5.3 ניהול סימולטני של העבודות באתר והייצור במפעל

בראייה לטווח ארוך, ההנחה היא שהבנייה המודולרית תתפוס, בסופו של דבר, נתח שוק של רבע, ואף יותר, מן הבנייה של דירות חדשות בישראל של הדור הבא, כלומר יותר מעשרת אלפים דירות לשנה. במצב כזה תהיה הצדקה כלכלית מלאה להקים בארץ (על-ידי השוק החופשי) מפעלים לייצור של יחידות מודולריות מובחרות הן בעבור דירות מגורים והן לצרכים אחרים. סביר להניח שהמפעלים האלה יהיו ברמת אוטומציה וטכנולוגיה גבוהה, ויצליחו למשוך אליהם הון אנושי מתאים מקרב תושבי הארץ. אבל, בטווח המידי, ככל הנראה, לא תהיה כדאיות כלכלית להקים בארץ מפעל לצורכי מספר פרויקטי פיילוט. יתר על כן, לנוכח הניסיון בחו"ל (Dean 461 בברוקלין) מוטב שלא להתחיל את החדרת הטכנולוגיה לישראל "ברגל שמאל", אלא ליצור שיתופי פעולה עם מפעלי ייצור איכותיים בתחום (שיבדקו היטב על-ידי וועדה מקצועית) מחו"ל. שיתוף הפעולה יתמקד הן בייצור היחידות המודולריות בעבור סדרות הפיילוט הראשונות, והן בהעברת ידע והכשרת עובדים ישראלים, לא רק בתהליכי הייצור, אלא גם בתהליך הכולל, **תוך שיתוף אמיתי בניסיון הכולל של המפעל ושל שותפיו לפרויקטים שהיו מוצלחים מכל הבחינות, לצד לקחים מפרויקטים אשר כשלו בהיבט כזה או אחר.** המטרה של כל אלה היא להבטיח כמה שאפשר הצלחה בפרויקטים הראשונים בארץ, ואח"כ המשך הצלחה גם בפרויקטים הבאים.

בהסתכלות ארוכת טווח, סביר להניח שתאגידי הבנייה הגדולים בארץ ייכנסו לתחום הבנייה המודולרית, ויקימו מפעלי ייצור משלהם, בדומה למפעלי הבנייה הטרומית מבטון. ברם, ייתכן בהחלט, שיקומו גם חברות חדשות לתחום הייעודי של בנייה מודולרית, וגם כמה מפעלים אשר יתמקדו רק בייצור של יחידות מודולריות אשר ישרתו את כלל השוק (בדומה למפעלי לוח"דים). תהיינה ההתפתחויות אשר תהיינה, עידן הבנייה המודולרית יכריח את העוסקים בו לעבוד בצורה הרבה יותר מתוכננת, מתוזמנת, עם היערכות ותכנון מראש, ועם פחות אלתורים של הרגע האחרון. טכנולוגית

הבנייה המודולרית מחייבת ניהול סימולטני של הייצור והשילוח במפעל יחד עם סדר ההרכבה וקצב ההרכבה באתר. יש לא מעט קווי דמיון בין שיטת הבנייה המודולרית לשיטת ההרכבה הטרומית, ומי שצבר ניסיון טוב בתחום הבנייה הטרומית יקל עליו להשתלב בתחום הבנייה המודולרית. אכן, בתחום הבנייה הטרומית (הן של בניינים והן של תשתיות) יש בארץ לא-מעט מנהלי פרויקטים בעלי ניסיון טוב, אך יחד עם זאת, בגלל ההיבטים הייחודיים, מומלץ מאד ללמוד כל מה שאפשר מניסיונם של אחרים, ולא להתעקש לנסות את כל השגיאות בעצמנו.

8.5.4 ניהול האיכות

אחת התכונות המייחדות את שיטת הבנייה המודולרית היא הגימור ה"כמעט מושלם" של כל יחידה במפעל, בתנאי עבודה ותנאי ייצור "כמעט מושלמים", ולכן, ניתן לצפות שגם האיכות של המוצר תהיה "כמעט מושלמת". ברם, הואיל ובמסגרת ה"כמעט", נשארים כמה וכמה תנאי שפה לא-סגורים, בעיקר בחיבורים ובממשקים שבין היחידות לבין עצמן, ובינן לבין הגרעין המרכזי והמערכות החיצוניות, יש בהחלט סיכון לכשלים ולאי התאמות בנקודות תורפה כאלו. יש להיזהר ולהישמר מפני הסתמכות יתר על השיטה שהיא, לכאורה, חסינה מטעויות, ולצפות דווקא לבלתי-צפוי.

בנוסף לכך, גם אם כל יחידה נבדקת ביסודיות במפעל, בעמדה מיוחדת, או באמצעות צב"ד (=ציוד בדיקה) מיוחד לקראת האריזה והמשלוח, עדיין יש סיכוי שמשהו יזוז או ייפגע בטלטולי הדרך או בעת הטעינה, הפריקה, או ההרכבה.

תהליך ניהול האיכות מבוסס לכן, באופן מעשי, על שלושה שלבים:

1. בעת ייצור היחידות הבודדות במפעל חייבים לבצע לכל יחידה מכלול של פעולות "הבטחת איכות" ו"בקרה בתהליך", בעיקר בסיומו של כל שלב ביניים בייצור היחידה, ולתעד את הממצאים. יש לכך שיטות מתאימות ובדוקות, הן בתעשיות הייצור, הן בתעשיית הבנייה והן בחברות בנייה מודולרית בחו"ל;
2. בקרות שיטתיות בשלבי ההרכבות והחיבורים באתר;
3. המבנה כולו צריך לעבור לפני המסירה בדיקת הפעלה והרצה בצורה שיטתית ומתוכננת היטב, הן של המערכות האלקטרו-מכניות והן של מערכות האיטום, הביוב, הניקוז, החיפויים החיצוניים, הגג וכיו"ב.

כל הנאמר לעיל התייחס בעיקר לחלקי המבנה המורכבים בעיקר מן היחידות המודולריות. כמובן, כמו בכל בניין, יש לערוך בקרות ובדיקות שיטתיות גם לכל חלקי הבניין הלא-מודולריים, כמו: חדרי המדרגות, המעליות, הממ"דים, החניונים וכל יתר השטחים של הרכוש המשותף.

8.5.5 ניהול הבטיחות

בדומה לציפיות הגבוהות בתחום האיכות, קיימות, על פי הספרות העוסקת בנושא, ציפיות גבוהות מבנייה מודולרית גם בתחום הבטיחות. ברם, ראוי לזכור שמבחינת בטיחות העובדים במפעל הייצור זה מתקבל בזכות תנאי העבודה המבוקרים ושגרת העבודה של מפעל קבע לעומת אתר בנייה. לעומת זאת, באתר הבנייה העבודה מצוינת כבטוחה יותר בעיקר בזכות הקטנת סך כל החשיפות למצבים מסוכנים הנובעת מקיצור משך העבודה באתר, מניעת הצורך בפיגומים, והקטנת צוות העובדים.

יחד עם זאת, טכנולוגית הבנייה המודולרית מביאה לאתר ההרכבה סיכונים חדשים שאינם קיימים באתרים רגילים, ומחובתנו לתת עליהם את הדעת, להיערך לקראתם, למזער את רמות הסיכון שהם מייצרים, ולנתר אותם לצורך שיפור מתמיד. בין אלה ניתן למנות את ההתעסקות עם עגורנים מתנייעים גדולים וכבדים במיוחד, את ההתעסקות עם מטענים כבדים ומגושמים אשר עלולים בקלות למחוץ אדם אל מותו, וכן את החשיפות ההדדיות של צוותי עבודה בלתי מתואמים ביניהם, אשר עוסקים, באותו מרחב ובאותו זמן במשימות שהן, לכאורה, עצמאיות. במסגרת מחקר של רוזנפלד (2010) הותוותה גישה לזיהוי ואיתור של סיכונים מעין אלה, אשר מגיעים בד"כ כ"עסקת חבילה" יחד עם שיטות בנייה חדשות.

אין ספק שניתוח מקצועי-בטיחותי מסודר של שיטות בנייה מודולרית אופייניות יחשוף מפגעי בטיחות פוטנציאליים מעין אלה, ויוכל "להקדים תרופה למכה" במובנים רבים. מומלץ מאד לכלול את ההיערכות המוקדמת בנושא הבטיחות במסגרת הפעילויות המסודרות של הכנסת הבנייה המודולרית ארצה. אפשר ורצוי לכלול אנשי מקצוע מעולים בתחום הבטיחות בבנייה במשלחות של הצוותים המקצועיים שייצאו לחו"ל כדי להתאמן בשיטה המודולרית. אלה יוכלו לאתר ו"לנקות" במקור לא מעט מפגעי בטיחות, ולהציע שיפורים מעשיים עוד לפני הבאת השיטות ארצה כמו שהן. הדברים אמורים בעיקר לגבי ההרכבה באתר, השינוע והתובלה. לא מן הנמנע שמומחים ישראלים בתחום הבטיחות בעבודה יזהו גם הזדמנויות לשיפור במפעלי הייצור בחו"ל, וידאגו להביא ארצה, בבוא העת, תהליכים שהם כבר משופרים.

8.5.6 מראי מקום

רוזנפלד, י., 2010, "פיתוח וניסוי של שיטה להערכת רמת הבטיחות והגהות בעבודה בשיטות חדשניות של בנייה מתועשת". דו"ח מחקר לפעולה מונעת, משרד התמ"ת, המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון, 2010.

Han, S., Al-Hussein, M., Al-Jibouri, S., Yu, H., 2012, "Automated post-simulation visualization of modular building production assembly line". Automation in Construction 21 (2012) p229-236.

Lee, J., Park, M., Lee, L., Kim, T.Y. Kim, S., Hyun, H., 2017, "Workflow Dependency Approach for Modular Building Construction Manufacturing Process Using

- Dependency Structure Matrix (DSM)". *KSCE Journal of Civil Engineering* (2017) 21(5):1525-1535
- Moghadam, M., Alwisy, A., Al-Hussein, M., 2012, "Integrated BIM/Lean Base Production Line Schedule Model for Modular Construction Manufacturing". *Construction Research Congress 2012*, ASCE, p1271-1280.
- Mansooreh Moghadam, Mohamed Al-Hussein, Saad Al-Jibouri, and Avi Telyas, 2012, "Post simulation visualization model for effective scheduling of modular building construction". *Can. J. Civ. Eng.* 39: 1053-1061.
- Olearczyk, J., Al-Hussein, M., Bouferguene, A., Telyas, A., 2012, "3D-Modeling for Crane Selection and Logistic for Modular Construction On-Site Assembly". *Computing in Civil Engineering*, p445-452.
- Rogan, A.L., Lawson, R.M., Bates-Brkljac, N., 2000, "VALUE AND BENEFITS ASSESSMENT OF MODULAR CONSTRUCTION". The Steel Construction Institute, in Association with Oxford Brookes University.
- Yu, H., Al-Hussein, M., ASCE, M., Al-Jibouri, S., Telyas, A., 2013, "Lean Transformation in a Modular Building Company: A Case for Implementation". *Journal of Management Engineering*, 2013, 29(1), p103-111.

8.6 היבטים כלכליים

8.6.1 מבוא

בחינת ההיבט הכלכלי בבנייה מודולרית מתמקדת במספר היבטים:

- א. באיזו מידה כדאי לקבלנים המבצעים לבנות בנייה מודולרית
- ב. באיזו מידה כדאי ליזמים ליזום ולבנות בנייה מודולרית
- ג. באיזו מידה כדאי למשק שתבנה בנייה מודולרית
- ד. באיזו מידה ותנאים כדאי למשק לרכוש מבני בנייה מודולרית מייצור מקומי.

הכדאיות לקבלנים המבצעים נובעת מהעלות לבניית יחידה בבנייה קונבנציונלית לעומת בנייה מודולרית. מאידך, בהחלט אפשרי כי בעוד שהקבלן המבצע עשוי למצוא כי בנייה מודולרית עדיפה על בנייה קונבנציונלית מבחינת העלויות ומהירות הביצוע, היזם עשוי להיתקל בביקוש נמוך ובמחירים המשקפים דעות קדומות, כך שבהחלט ייתכן כי בעוד שהקבלן המבצע מוצא שהבנייה הזאת כדאית, היזם, עשוי לגלות כי מדובר בהפסד מבחינתו.

בבחינת הכדאיות מצד הקבלנים אנו עשויים למצוא כי אין כדאיות, אם בגלל העדר מודעות או חשש ממוצר חדש ולא ידוע, ולכן עלולים להיגרם הפסדים לקבלנים, אבל בהחלט ייתכן כי מבחינה משקית יש לבנייה מודולרית יתרונות שניתן לכמת אותם בערכים מאקרו כלכליים. במקרה כזה, המדינה עשויה להגיע למסקנה כי כדאי לה לתמוך בבנייה מודולרית, על ידי סבסוד בגובה ההפסד שעלול להיגרם לקבלנים, ואף יותר מכך, באופן ש"נטו" תושג תועלת משקית.

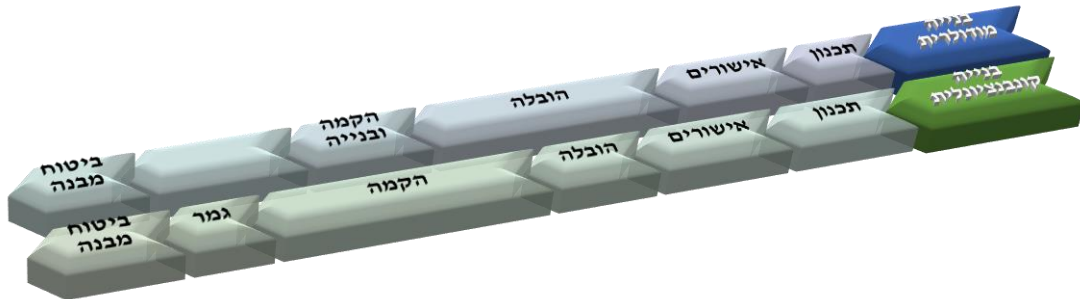
כל האמור אינו נוגע בהכרח להחלטה האם לרכוש את היחידות המודולריות התלת-ממדיות מייצור מקומי או מיבוא. שאלה זו עולה בנפרד, ודורשת מידע מסוג אחר, לרבות בחינה של יתרונות יחסיים של המשק בכלל וההשפעה על ענפים אחרים, שבחלקם מתחרים בכוח האדם הנדרש ומנגד עשויים לסבול מאקט של חיסרון לגודל.

חלק מן המרכיבים של עלויות הבנייה המודולרית גבוה מעלויות הבנייה קונבנציונלית, כגון עלויות הובלה ושינוע. עם זאת, לעתים רבות החיסכון בעלויות אחרות משתלם לטווח הרחוק גם ברמת הקבלן, וגם ברמת המשק. בסקירת הספרות של בנייה מודולרית בעולם, מצאנו כי הבנייה המודולרית מגלמת בתוכה חיסכון כלכלי של מספר מרכיבים, ביניהם: קיצור משך הבנייה, עלויות תכנון, אי שימוש בפיגומים, פסולת בניין, עלויות גימור ותחזוקה.

להלן, נפרק את תהליך הבנייה לגורמים השונים, ונעריך את העלויות של כל שלב. לאחר מכן, נחשב עלות של בניית בניין בן 20 קומות באזור המרכז בבנייה קונבנציונלית בהשוואה לבניין זהה בבנייה מודולרית. לבסוף, נציג את הרווח היזמי שמצאנו בפרויקטים השונים, ננסה לאמוד נזק/תועלת ברמה המשקית וכן נציג מודל תמרוץ ליזמים לטובת בנייה מודולרית.

8.6.2 שלבי הבנייה

להלן פירוט שלבי הבנייה השונים תוך השוואת שתי השיטות:



- (1) **תכנון** – אנו מניחים כי שלב התכנון בבנייה המודולרית יהיה קצר ופשוט יותר מהתכנון בבנייה הקונבנציונלית. ההבדל נובע משיטת הבנייה המודולרית – בה למעשה היזם מזמין מהמפעל מודלים מוכנים מתוך קטלוג של אפשרויות סופיות תוך שיש התאמה לתוכנית הבניין, לסוג הקרקע, הסביבה ותוכנית בניין ערים (תב"ע).
- (2) **אישורים** – כנגזרת ישירה של התכנון, שיעבור מן הסתם הליך רישוי מוקדם ויעמוד בתקני בנייה מחמירים כבר בשלב המפעל, אנו מעריכים כי ניתן להגיע למצב בו רמת האישורים הנדרשת הנגזרת מסוג הבנייה, צריכה להיות נמוכה יותר, כתוצאה מכך יידרש פחות זמן בדיקה והמתנה לקבלתם.
- (3) **הובלה** – בהנחה שבשלב ראשון לפחות הייצור יהיה במפעלים קיימים בחו"ל, שלב זה מורכב מהובלה ימית (בשלב זה, מאירופה) ומהובלה יבשתית מנמלי אשדוד או חיפה לאתר הבנייה. מאופי היחידות המודולריות השוקלות בין 10 ל-40 טון, יהיה צורך בשירותי הנפה והובלות מיוחדים. שלב זה צפוי להיות ארוך ויקר יותר ביחס לתהליך הבנייה הקונבנציונלי, שם שינוע חומרי בנייה הינו זול ופשוט יותר.
- (4) **הקמה ובנייה** – אחד היתרונות המרכזיים של תהליך הבנייה המודולרית, הוא קיצור זמני הבנייה באתר ביחס לבנייה הקונבנציונלית. התהליך עשוי להיות מהיר מאוד ביחס לבנייה קונבנציונלית, אולם בשל זמני ההובלה הימית הפערים יהיו קטנים יותר, אם כי מדובר בכמחצית הזמן, או אף פחות, מהזמן הדרוש לבנייה קונבנציונלית מרגע האישור.
- (5) **פיגומים** – כאשר היחידות מגיעות עם החזית הסופית אין צורך בפיגומים, ולכן עלויות פיגומים למעשה נחסכות הן מבחינת רכישה/השכרה והן מבחינת זמן הקמה.
- (6) **שיווק** – לפי הערכתנו, קבלנים שיבחרו לבנות בנייה מודולרית בשלב זה יצטרכו להשקיע תקציב שיווק נוסף לפרסום השיטה. מדובר בתחום הנמצא בחיתוליו בישראל, ויהיה צורך לייצר שכנוע נוסף בשל החשש הטבעי מטכנולוגיות חדשות ולא ידועות. כמו כן, קיים חשש מפרסומים לא רשמיים שינסו לחבל מסיבות שונות בשיווק יחידות אלה ולכן יידרש תקציב הסברה גדול יותר.

7) **גמר** – אחד השלבים שייחסכו בתהליך הבנייה המודולרית הוא שלב גמר המבנה. לאחר סיום גמר הבנייה לעתים מתגלים ליקויים והפרות המצריכים מקבלנים לבצע שינויים ותיקונים של גמר הבנייה. בבנייה המודולרית בה היחידות המודולריות מיוצרות באופן מדויק ומתוכנן במפעל באירופה, אנו צופים עלות כמעט אפסית של שלב זה. בפועל עלות התיקונים לאחר גמר הבנייה ובמהלך השנה הראשונה לאחר גמר הבנייה נאמדת בכ-2%. במקרה של הבנייה המודולרית האיכותית, סביר להניח כי 0.5% יהיה חסם עליון לעלות התיקונים הנדרשת.

8) **ביטוח מבנה** – ביטוח הקבלן מכסה ביטוח רכוש, צד שלישי, וביטוח חבות מעבידים. מתוקף אופי שיטת הבנייה המודולרית, יועסקו פחות עובדים באתר הבנייה, מה שמצמצם את הסיכוי לתאונות עבודה באתר. לכן, אנו מעריכים כי הביטוח בבנייה המודולרית יהיה זול יותר מהביטוח בבנייה הקונבנציונלית.

בטבלה 8.6.1 מוצגת השוואה של היתרונות המשפיעים על ההיבט הכלכלי.

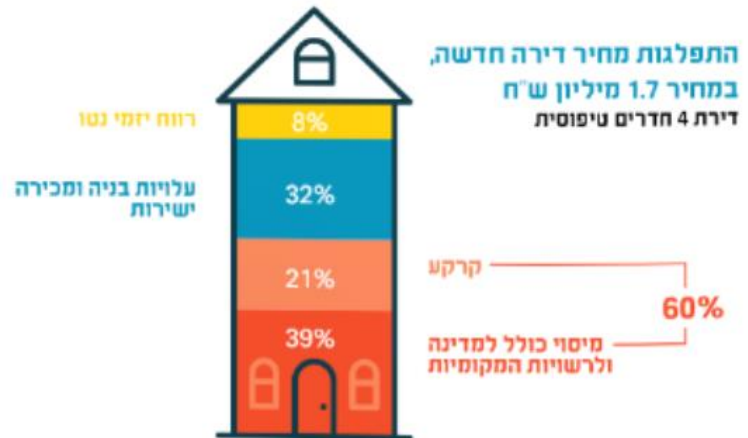
טבלה 8.6.1: השוואה של היתרונות המשפיעים על ההיבט הכלכלי לפי סוג טכנולוגית הבנייה

תכנון	בנייה קונבנציונלית	בנייה מודולרית
אישורים	יתרון גמישות	יתרון מהירות
הובלה	הובלת חומרים זולה וקלה יותר	הובלת היחידות יקרה, הן בהובלה ימית והן בהובלה יבשתית, ומסורבלת מבחינת תנועה בכבישים
הקמה ובנייה	מהירה יותר	מהירה יותר
פיגומים	אין צורך כמעט	אין צורך כמעט
שיווק	פשוטה יותר	מסובכת, מחייבת מאמץ הסברתי גדול יותר לפחות בשנים הראשונות
גמר	זולה יותר בגלל הגימור התעשייתי ומהירה הרבה יותר	זולה יותר בגלל הגימור התעשייתי ומהירה הרבה יותר
ביטוח מבנה לאחר מסירה	צפויות פחות תקלות בשל איכות תעשייתית מוקפדת	צפויות פחות תקלות בשל איכות תעשייתית מוקפדת
מימון	יקר יותר בשל התארכות הפרויקט	יקר יותר בשל התארכות הפרויקט

8.6.3 מרכיבי עלות הבנייה

8.6.3.1 סטטיסטיקה של עלויות השלבים השונים

על מנת להתמודד עם השוואת העלויות ננסה לפרק את מרכיבי עלות הדירה למקורותיה. על-פי מסמך התאחדות בוני הארץ (2018) התפלגות מחיר דירת 4 חדרים טיפוסים חדשה במחיר 1.7 מיליון ש"ח היא כלהלן:



מתוך מחיר מכירה של דירה 39% הם עבור מיסוי כולל למדינה ולרשויות המקומיות, 21% עבור הקרקע, 32% עבור עלויות בנייה ומכירה ישירות, ו-8% רווח יזמי נטו. טבלה 8.6.2 כוללת סיווג לפי שלבי הבנייה שהתווינו.

טבלה 8.6.2: סיווג מרכיבי הבנייה לפי שלבי הבנייה

שלב בנייה	מרכיב בנייה לפי התאחדות בוני הארץ	חלק מעלות דירה יחסי
קרקע ¹	קרקע	21%
תכנון + אישורים	מיסוי כולל למדינה ולרשויות מקומיות	39%
הקמה ובנייה + הובלות + גמר + שיווק + ביטוח מבנה	עלויות בנייה ומכירה ישירות	32%
רווח יזמי ²	רווח יזמי נטו	8%

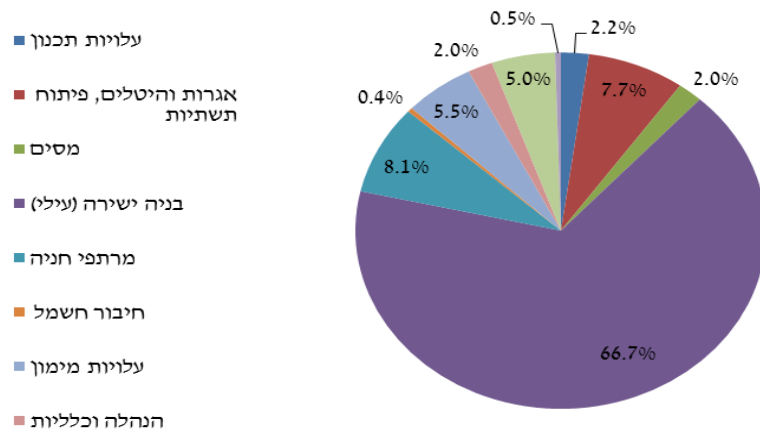
¹ שלב זה לא רלוונטי לניתוח הכדאיות שלנו

² הרווח היזמי הוא חלק מעלות מכירת הדירה, אך לא מעלות הבנייה, בה אנו מתמקדים במסמך זה

על בסיס השוואת מקרי בוחן רבים, החוקרים במחקר MODCONS מגיעים למסקנה כי הבנייה המודולרית כדאית בעיקר בפרויקטים גדולים. הם מוצאים כי בשיטת הבנייה המודולרית מושג חיסכון כספי של 0.5% עבור כל חודש עבודה שנחסך. העלות הזו מתורגמת לחיסכון של 3%-6% מהעלות הכוללת לבנייה, עבור פרויקטים בהם זמן הבנייה התקצר בכ- 6 חודשים. עלויות התכנון והעיצוב קטנות ויכולות להוריד עד 2% נוספים מסך עלות הבניין, ויחד עם החיסכון בעלויות הגימור, הם הגיעו למסקנה כי סך העלות הנחסכת בבנייה מודולרית בבניינים גבוהים יכולה לנוע בין 5% ל-9%. מכאן אנו יכולים לגזור כי עלות הבנייה הנחסכת (ללא צמצום העלויות הנובע מהחיסכון בזמן) הוא כ-3%-2%. נציין כי בספרות יש טענות שבפרויקטים גדולים אפשר להגיע לחיסכון עלויות של 10%-20% בנוסף לצמצום זמני הביצוע (Lawson et al. 2005). לא ראינו הוכחות מובהקות לטענות אלה, שבחלקן נטענות על בסיס אנליטי יותר מאשר אמפירי ולכן בשלב זה, ניצמד ל-3% לפי דוח MODCONS.

אם מרכיב הקרקע והמיסוי מהווים במצטבר 60% מערך הדירה, הרי האומדנים האופטימיים המדברים על חיסכון של 3% בעלות בנייה מודולרית, יכולים להשפיע לכל היותר על 25% מהעלות, קרי 0.75% ממחיר הדירה כולה. ברור, אפוא, כי הערך הטמון בבנייה כזו אינו בחיסכון ליזמים או הקבלנים, בפרט שהסיכון הכרוך בטכנולוגיה זו, הן מצד מרכיבי עלות בשינוע ובהזמנה והן מצד תגובת השוק, אינו מוצדק. כלומר במידה וקיים פוטנציאל כלשהו, הרי הוא מתקיים ברמה המשקית, ושם יש לחפש את התועלת המשקית המצרפית, ועל בסיס נתונים אלה להחליט האם יש לתמוך בצורת בנייה זו, או לא.

במחקר "רכיבי עלויות הבנייה למגורים ומשקלם במחיר הדירה" בהזמנת משרד הבינוי והשיכון (2015), נמצא כי עבור בניינים בני 16 קומות ומעלה באזור המרכז העלות למ"ר מתוך מחיר המכירה היא כלהלן: 2,036 ₪ למ"ר עבור קרקע מושבחת; 472 ₪ למ"ר עבור אגרות, היטלים ופיתוח תשתיות; 121 ₪ למ"ר עבור מיסים ממשלתיים; 4,110 ₪ למ"ר עבור בנייה ישירה עילית; 500 ₪ למ"ר עבור מרתפי חניה; 135 ₪ למ"ר עבור הוצאות תכנון; 24 ₪ למ"ר עבור חיבור חשמל; 308 ₪ למ"ר עבור הוצאות פרסום ושיווק; 121 ₪ למ"ר עבור הוצאות הנהלה וכלליות; 28 ₪ למ"ר לבצ"מ ו-340 ₪ למ"ר עבור עלויות מימון. בנוסף, נמצא במחקר כי מתוך סך מחיר מכירה כולל מע"מ למ"ר בגובה 11,909 ₪ - הרווח היזמי הוא 2,071 ₪ למ"ר והמע"מ (שעמד באותה תקופה על 16%) הוא 1,643 ₪ למ"ר. בצירוף 8.6.1 מוצג המשקל היחסי של עלויות הבנייה מתוך מחיר הבנייה גרידא (ולא מתוך מחיר המכירה). לכן, לצורך כך נתעלם מהרווח היזמי והמע"מ. בנוסף, נתעלם ממחיר הקרקע, שהיא גורם קבוע בכל צורות הבנייה.



צור 8.6.1: המשקל היחסי של עלויות הבנייה מתוך מחיר הבנייה גרידא

בטבלה 8.6.3 סווגנו את העלויות לפי שלבי הבנייה שהגדרנו בתחילת הפרק, ותקננו את העלויות לפי מדד תשומות הבנייה מדצמבר 2012 למרץ 2019.

במחקר לא הייתה התייחסות לעלויות תיקונים בתקופת האחריות, לכן רכיב זה חסר.

8.6.3.2 ניתוח ספציפי כבסיס להשוואה בין שיטות הבנייה

עלויות הבנייה ליזם המקים דירות מגורים מורכבות מעלויות בנייה ישירות ועלויות בנייה עקיפות. עיקר העלויות הינן עלויות הבנייה הישירות, אשר הינן העלויות המשולמות לקבלן עבור הבנייה הישירה: יסודות הבניין ופתוח השטח, שלד והתקנת פרטי הגמר. בנוסף לעלויות ישירות, מתווספות לקבלן עלויות הבנייה העקיפות שהינן העלויות שאינן משולמות לקבלן המבצע אלא לגורמים אחרים. עלויות אלו מורכבות בעיקר מתכנון הפרויקט, קבלת היתר בנייה והאישורים הנדרשים, וליווי יועצים במהלך הפרויקט. עלויות אלו כוללות: עלות תשלומים לרשות מקרקעי ישראל, עלויות היטלי פיתוח ואגרת בנייה, אגרות היתר, עורך דין, מכון התקנים, צילומי תוכניות, שכר יועצים שחובה להעסיק (אדריכל, מהנדס בניין, מנהל אתר עבודה, יועץ קרקע, מודד) ויועצים שהעסקתם אינם בגדר חובה (כגון עיצוב פנים)³.

עלויות הבנייה הישירה בישראל נפרסות על טווח מאוד רחב, המשתנה ביחס למיקום הגאוגרפי של הבנייה, איכות החומרים, רמת מפרט, גודל הפרויקט, ועוד. מחיפוש שיטתי ברשת מצאנו כי טווח זה יכול לנוע בין 3,400 ועד 10,000 ₪ למ"ר. לרוב, טווח המחירים נע בין 5,000 ל-6,000 ₪ למ"ר⁴.

עלויות פיגומים תיחסנה בבנייה המודולרית המגיעה עם חזיתות מוגמרות. על אף שמדובר בעלות של 23-25 ₪ למ"ר בלבד, מדובר בעלויות הניתנות לחישוב.

³ אתר אדריכלות ובנייה בישראל - https://architecture.org.il/menu_mimun.php
⁴ שם, BDO, דפי זהב, בצת אילון בע"מ, לוי יצחק

טבלה 8.6.3: עלויות לפי שלבי הבנייה, מתוקננות לפי מדד תשומות הבנייה מדצמבר 2012 למרץ

2019

	חלק יחסי ביחס למחיר הבנייה הכולל	עלות למ"ר (ש) (למ"ר)	מרכיב בנייה לפי מחקר "רכיבי עלויות הבנייה למגורים ומשקלם במחיר הדירה" – מתוקנן למרץ 2019	שלב בנייה
2.2%	2.2%	148	עלויות תכנון	תכנון
9.6%	7.7%	517	אגרות והיטלים, פיתוח תשתיות	אישורים
	2.0%	133	מסים	
82.7%	66.7%	4505	בנייה ישירה (עילי)	הקמה ובנייה + הובלות
	8.1%	548	מרתפי חניה	
	0.4%	26	חיבור חשמל	
	5.5%	373	עלויות מימון	
	2.0%	133	הנהלה וכלליות	
5.0%	5.0%	338	פרסום ושיווק	שיווק
0.5%	0.5%	31	גמר	גמר
-	-	-	-	תקופת אחריות
100%	100%	6,751		סה"כ מחיר בנייה

לדוגמא: בניין בן 10 קומות עם 4 דירות בקומה, גובהו עשוי להיות כ- 30 מטרים, שטח קומה כ- 500 מ"ר והיקפו כ- 90 מטרים. המשמעות היא שטח פיגומים של כ- 2,700 מ"ר ועלות של 24X90X30 = כ- 65,000 ₪. ניתן להעריך כי בבניין של 10 קומות עלות הפיגומים והתקנתן תהיה עד כ- 100,000 ₪.

לעומת זאת, בבנייה המודולרית קיימות עלויות שלא קיימות בבנייה הקונבנציונלית, כגון הובלה ימית של יחידות מודולריות. טרם התבצעה הובלה ימית של יחידות מודולריות איכותיות לישראל, אך מצאנו כי הובלה ימית של מכולה מאירופה לישראל עולה בין 1,200-1,550 ₪⁵. העלות ליחידה מודולרית שאורכה כ-12-10 מטר ורוחבה כ- 3.5 מטר, בתוספת לאבזרים שיידרשו על מנת לשאת יחידות האחת

⁵ yep

על גבי השנייה ללא פגע, עשויים להביא את מחיר ההובלה הימית של יחידה לסכום של כ- 3,500 – 4,000 ₪. בנוסף, עלויות ההובלה היבשתית, ההנפה והשינוע בבנייה המודולרית יהיו גבוהות בהרבה. כך לדוגמא, לפי הצעת מחיר שקיבלנו מחברת תעבורה⁶, עלות הובלה בלבד בליווי אישי ליחידה מודולרית במשקל 20 טון היא 2,500 ₪. מאחר ומדובר בשתי הובלות האחת בארץ המוצא והאחת בישראל, מדובר בהוצאה כוללת של כ-6,000 ₪ ליחידה ששטחה כ- 35 מ"ר, ולזה יש להוסיף את זמני ההמתנה, שכן הובלת יחידות בזו אחר זו לאתר, מייצרת גם צורך של פריקה מיוחדת תוך המתנה של המובילים עם עלות שיכולה להגיע לכ- 1,500 ₪ נוספים ויותר על מנת להימנע מהפעלה כפולה של מנף לאותה יחידה.

להערכתנו העלות של הובלת יחידה ממקום הייצור ועד להרכבתה כולל העלויות הלוגיסטיות הנלוות, עשויות להגיע לכ 7,500 ₪ שהן כ- 200 ₪ למ"ר.

משיחות עם מומחים בתחום מחברות תעבורה ומנפי אבי, גילינו כי יש קושי לאמוד את עלות ההנפה ליחידה מודולרית. כיוון שמדובר בתחום שעדיין נמצא בחיתוליו בישראל, המומחים לא יכלו לתת אפילו אומדן או טווח. לשם השוואה, עלות ההובלה וההנפה בבנייה קונבנציונלית של חומרי הגלם קטנה באופן משמעותי ונעה בין 100-120 ₪ למ"ר⁷.

בדקנו את הוצאות הנהלה וכלליות והוצאות השיווק בדוחות כספיים⁸ של חברות בניין שונות: בדניה סיבוס נכון לשנת 2014 הוצאות הנהלה וכלליות מהוות 1.9% מעלות המכר והוצאות שיווק ופרסום מהוות 1.1% מעלות המכר. בחברת אפריקה מגורים נכון לשנת 2018 הוצאות הנהלה וכלליות מהוות 2.5% מעלות המכר, והוצאות שיווק ופרסום מהוות 3.4% מעלות המכר. בקבוצת אשטרום נכון לשנת 2017 הוצאות הנהלה וכלליות מהוות 7.29% מעלות המכר, והוצאות שיווק ופרסום מהוות 1.26% מעלות המכר. בקבוצת אפקון נכון לשנת 2017 הוצאות הנהלה וכלליות מהוות 6.32% מעלות המכר, והוצאות שיווק ופרסום מהוות 3.15% מעלות המכר. בחברת דמרי בנייה ופיוח בע"מ, נכון לשנת 2018 הוצאות הנהלה וכלליות מהוות 5.4% מעלות המכר, והוצאות שיווק ופרסום מהוות 3.5% מעלות המכר. בחברת אזורים חברה להשקעות בפתוח ובניין בע"מ, נכון לשנת 2018 הוצאות הנהלה וכלליות מהוות 6.7% מעלות המכר, והוצאות שיווק ופרסום מהוות 4.2% מעלות המכר.

8.6.3.3 משך השלבים השונים

שלבי התכנון, קבלת האישורים וקבלת היתר הבנייה נמשכים זמן רב בישראל. כל בנייה ללא היתר, או בניגוד להיתר, היא עברה פלילית. את ההיתרים מעניקה הרשות המקומית או רשות הרישוי. העיכובים במתן היתרי הבנייה גורמים לעליית מחירי הדירות בשל מחסור בהיצע, להאטה במשק ולירידה בהתחלות הבנייה. ניתן לומר שהיתרי הבנייה הם צוואר הבקבוק של הענף. בוצעו ניסיונות שונים

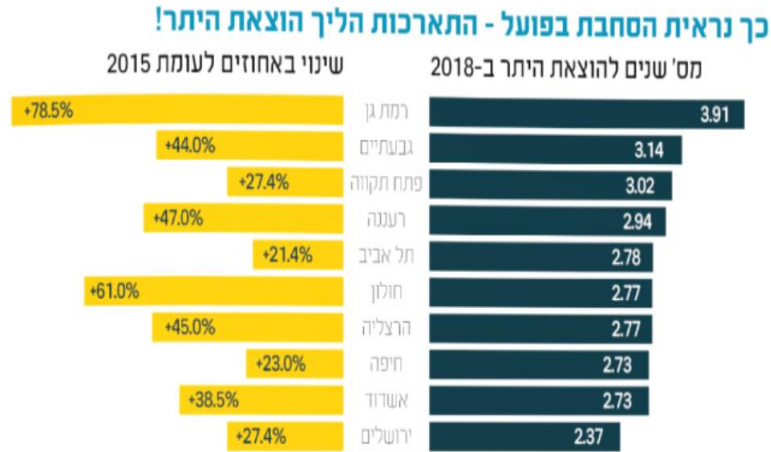
⁶ התקבלה הצעת מחיר מהחברה בתאריך 19.3.19

⁷ מבוסס על ניתוח מחירי פורטל הובלות באביב

⁸ מצאנו את הדוחות הכספיים של החברות השונות בפורטל מאיה – הבורסה לניירות ערך

להבטיח את צמצום זמן קבלת ההיתר ל-60 ול-90 יום, אך בפועל תהליך מתן היתרי הבנייה אורך בין שנה לשלוש שנים, ולפעמים אף הרבה יותר. לפי רוני בריק, נשיא התאחדות בוני הארץ: "לפי הלמ"ס ובנק ישראל זמן ההמתנה מרגע השלמת אישור התוכניות ועד קבלת היתר בנייה עומד על שנה וחצי בממוצע, אבל האמת היא שבפועל פרק הזמן הזה ארוך בהרבה, כמעט תמיד"⁹.

על-פי התאחדות בוני הארץ (2018), ב-2018 הוצאת היתר נעה בין 2.37 שנים בירושלים ועד 3.91 שנים ברמת גן, כמוצג באיור מצוטט מדו"ח ההתאחדות.



על-פי אותו דו"ח, מאז 2011 משך זמן הבנייה הממוצע לדירה בישראל המשיך לעלות, ועמד ב-2018 על יותר מ-30 חודשים, כמוצג באיור המצוטט מהדו"ח הנ"ל:



במקרה הפרטי של 20 דירות (בדרך כלל כ-5 קומות בבנייה רוויה) ניתן לראות כי בישראל נדרשים 24 חודשים לבניית מבנה מגורים כזה, בעוד שבארה"ב בניית אותו מבנה לוקחת 17.5 חודשים.

⁹ על בסיס: "מדינת חלם – זמן יקר" בתוך ידיעות אחרונות מוסף נדל"ן, כתבה מ-7/10/18 (הכתבה מבוססת על ראיונות עם אנשי מקצוע בתחום הבניין, ביניהם רוני בריק – נשיא התאחדות בוני הארץ ועוד); למ"ס, לא כולל צמודי קרקע בבנייה עצמית.

לעומת זאת, בהסתמך על מקרי בוחן של בנייה מודולרית בעולם, דו"ח MODCONS טוען כי בבנייה מודולרית, המשלבת יחידות ללא קונסטרוקציה תומכת נוספת, משך הפרויקט מתקצר בכ-55% עד 65%. בבנייני מגירות, בהם היחידות מונחות על מבנה עם תקרות בטון משך הפרויקט מתקצר בכ-35% עד 45%. לאוסון ואוגדן (Lawson and Ogden 2011) מעריכים שהסיכון בזמן בבנייה מודולרית הוא כ-30%-50% לעומת הבנייה הקונבנציונלית.

6.8.3.4 עלות הדירה לקונה

עסקה ממוצעת בשנת 2017 הסתכמה ב-1.47 מיליון שקל, עלייה של 0.8% לעומת 2016 (התאחדות בוני הארץ בשיתוף עם BDO (1)). בעבודה זו, ביצענו השוואה עבור דירות בנות 4 חדרים בשטח של 102 מ"ר לדירה. בעבר, אגף שומת מקרקעין במשרד המשפטים היה מבצע סקירות של השתנות מחירי דירות מגורים סטנדרטיות בנות 4 חדרים ב-16 ערים גדולות בישראל. בסקירתו האחרונה משנת 2016¹⁰, מחירי הדירות היו כנתון בטבלה 8.6.4.

טבלה 8.6.4: מחירי הדירות בשנת 2016, לפי שומת מקרקעין במשרד המשפטים

מחיר ממוצע מעוגל לדירת 4 חדרים Q2/2016	הישוב
ב	א
1,145,000 ₪	אילת
1,464,000 ₪	אשדוד
1,135,000 ₪	אשקלון
1,064,000 ₪	באר שבע
2,402,000 ₪	הרצליה
1,686,000 ₪	חולון
1,374,000 ₪	חיפה
1,948,000 ₪	ירושלים
1,859,000 ₪	כפר סבא
1,879,000 ₪	מודיעין
1,670,000 ₪	נתניה
1,626,000 ₪	פתח תקוה
1,716,000 ₪	ראש"צ
1,531,000 ₪	רחובות
1,293,000 ₪	רמלה
3,091,000 ₪	תל אביב

¹⁰ סקירת השתנות מחירי דירות מגורים סטנדרטיות בנות 4 חדרים ב-16 ערים גדולות, בתקופה שבין הרבעון ראשון 2009 לרבעון שני 2016.

אם נוריד את תל אביב הנמצאת בפער חריג מכל השאר, נראה שטווח מחירי דירות בנות 4 חדרים נע בין 1,064,000 ₪ בבאר שבע ל-2,402,000 ₪ בהרצליה. בהתחשב בטווח המדובר ובעליית מחירי הדירות משנה לשנה, נראה לנו כי הנחה סבירה היא שב-2019 דירת 4 חדרים בפתח תקווה או בראשון לציון תעלה סביב 1,800,000 ₪. אכן, חיפוש קצר של מחירי דירות 4 חדרים באתר מדלן¹¹ באזורים הללו העלו מחירים סביב 1.8 מיליון ₪. למעשה בתל אביב יש פערים גדולים במחיר בין האזורים השונים, כך שאם נתייחס למשל ליד אליהו או אזורים אחרים בדרום העיר, אנו עשויים לקבל מחירים הדומים יותר לממוצע הארצי, כך שהמחיר של 1.8 מיליון יהיה מחיר המשקף הן את מרבית המדינה והן חלק לא מבוטל של תל אביב.

8.6.3.5 התחלות וגמר בנייה בישראל

טבלה 8.6.5 כוללת נתונים נבחרים של ענף הבנייה לשנים 2010 עד 2017¹².

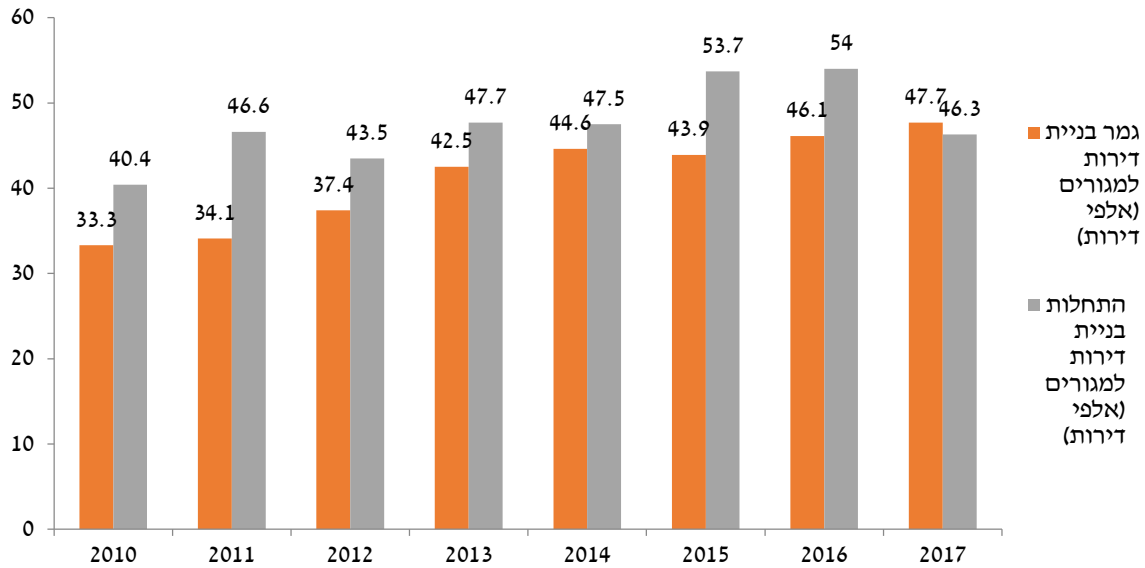
ציור 8.6.2 כולל גרף בו ניתן לראות את סך התחלות בניית הדירות למגורים אל מול גמר בניית דירות למגורים, בשנים 2010-2017 (באלפי דירות), ואת שטח ההתחלות של בנייה למגורים (באלפי מ"ר).

טבלה 8.6.5: נתונים נבחרים של ענף הבנייה לשנים 2010 עד 2017

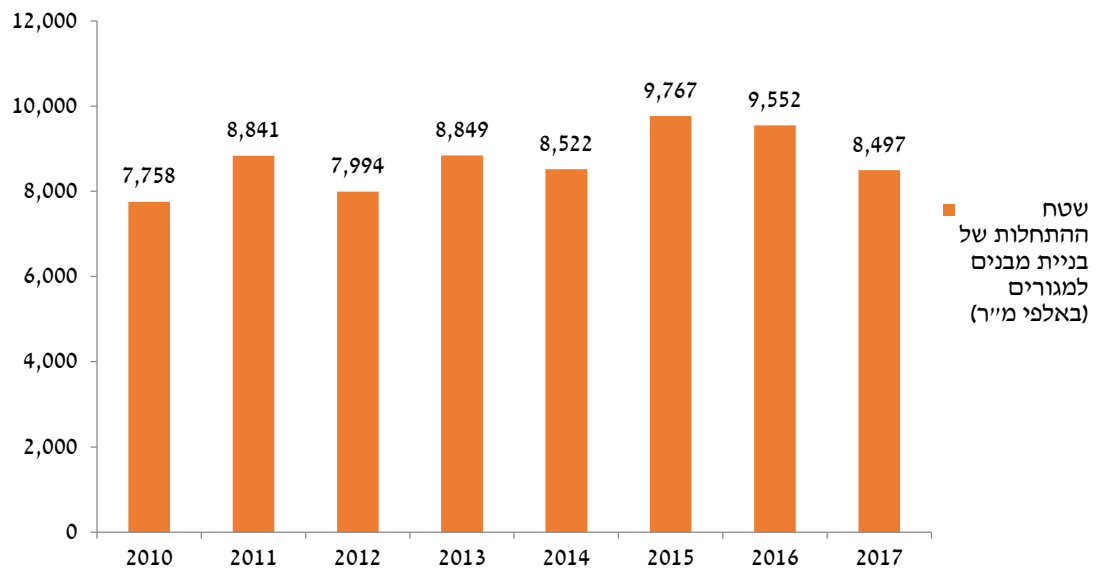
התחלות בניית דירות למגורים		גמר בניית דירות למגורים			שטח ההתחלות של בניית מבנים			השנה	
סך הכול	בנייה ציבורית	בנייה פרטית	סך הכול	בנייה ציבורית	בנייה פרטית	לענפי המשק	למגורים		
(אלפי דירות)			(אלפי דירות)			(אלפי מ"ר)			
40.4	4.9	35.5	33.3	4.7	28.5	2,616	7,758	10,374	2010
46.6	7.4	39.3	34.1	3.9	30.2	2,625	8,841	11,466	2011
43.5	6.9	36.6	37.4	5.3	32.1	3,108	7,994	11,102	2012
47.7	10.2	37.5	42.5	7.1	35.3	3,232	8,849	12,081	2013
47.5	11.0	36.5	44.6	7.1	37.5	2,259	8,522	10,781	2014
53.7	11.0	42.7	43.9	8.3	35.6	3,021	9,767	12,788	2015
54.0	-	-	46.1	-	-	2,418	9,552	11,970	2016
46.3	-	-	47.7	-	-	3,032	8,497	11,529	2017

¹¹ מדלן

¹² החל משנת 2016 הנתונים לפי צד יוזם (פרטי וציבורי) אינם זמינים בלשכה המרכזית לסטטיסטיקה ולכן אינם מוצגים בלוח



שטח ההתחלות של בניית מבנים למגורים (באלפי מ"ר)



ציור 8.6.2: סך התחלות בניית הדירות למגורים אל מול גמר בניית דירות למגורים, בשנים 2010-2017 (באלפי דירות), ושטח התחלות בנייה למגורים (באלפי מ"ר)

בנתונים אלה של בנק ישראל¹³ ניתן לראות כי בשנת 2017 החלה בנייתן של 46,300 דירות חדשות למגורים, אל מול גמר בנייה של 47,700 דירות. שטח ההתחלות של בניית מבנים למגורים בשנה זו עמד על 8,497,000 מ"ר. לפי הלמ"ס (2018), בחודשים אוקטובר 2017-ספטמבר 2018 החלה בנייתן של כ-44,510 דירות והסתיימה בנייתן של 47,700 דירות. בסך הכל, בין השנים 2013-2017

¹³ "ענף הבנייה - נתונים נבחרים, 1970 עד 2017" באתר בנק ישראל

כולל (טווח של 5 שנים): התחילה בנייתן של 249.2 אלף דירות שהשתרעה על 45,187 אלפי מ"ר. בטווח זה הסתיימה בנייתן של 224.8 אלף דירות.

אם ניקח את אחוז השינוי השנתי הממוצע בין השנים 1970 ועד 2017 בשטח התחלות הבנייה של מבני מגורים, נמצא כי אחוז השינוי השנתי הממוצע עומד על 3%. אם כך, ניתן להניח שבשנים 2018-2022 שטח התחלות הבנייה יעמוד על 8,752, 9,014, 9,285, 9,563 ו-9,850 אלפי מ"ר בהתאמה. סך הכל על פי הנתונים המצויים בידינו, אנו חוזים כי בחמשת השנים 2018-2022 שטח ההתחלות של בנייה למגורים יעמוד על 46,465 אלף מ"ר. אחוז השינוי השנתי הממוצע בהתחלת בניית דירות למגורים בין 1970 ועד 2017 עומד גם כן על 3%. מחישוב שלנו עולה כי בין השנים 2018-2022 תחל בנייתן של 47,689, 49,120, 50,593, 52,111, 53,674 דירות בשנה, בהתאמה.

אם נחלק את מספר התחלות בניית הדירות החדשות בשנה לפי תחזית ל-5 שנים הקרובות בשטח התחלות הבנייה הממוצע לשנה ל-5 שנים הקרובות, נמצא כי שטח התחלות הבנייה לכל דירה הוא כ-183 מ"ר בממוצע. עם זאת, נציין כי השטח הממוצע של דירה בפועל קטן יותר, כיוון שמדובר "בשטח התחלה של בניית מבנה" הכולל שטחי ציבור כמו מסדרון, מעליות, וחדר מדרגות.

8.6.4 חישוב כדאיות

8.6.4.1 כללי

על מנת לחשב את הכדאיות הכלכלית של בנייה מודולרית בישראל נשווה בין בנייה של 2 בניינים: אחד הבנוי בשיטה הקונבנציונלית, ואחד הבנוי בשיטה המודולרית. לשם השוואה, הקפדנו על אחידות במאפייני הבניינים, אם כי לשיטת הבנייה עשויה להיות השפעה מסוימת על צורת הבניין, רמת הגמר והיבטים נוספים. עדיין המרכיבים העיקריים יהיו דומים מאוד עד זהים, בפרט השטחים של הדירות, שטחי הציבור ומאפייני איכות שונים.

8.6.4.2 מאפייני המבנים

להשוואה: בניין בגובה 20 קומות (20 קומות מגורים ועוד קומת קרקע), בכל קומה 4 דירות. כל דירה מורכבת מ-3 יח' מודולריות. כל יחידה מודולרית היא באורך 10 מטר, רוחב 3.4 מטר וגובה 3 מטרים. משמע, כל דירה היא בשטח 105 מ"ר. סה"כ 420 מ"ר דירות לקומה. שטחי הציבור (מעליות, מעבר בין דירות, חדר מדרגות) הוא 30 מ"ר (כך שכל קומה היא בשטח 450 מ"ר). רוחב כל קומה הוא כ-30 מ', אורך 15 מ' וגובה 3 מ', כך שהיקף הבניין הוא 92 מ' וגובהו 63 מ'. בטבלה 8.6.6 נתון פירוט עלויות הבנייה שלקחנו בחשבון.

לא נלקחו בחשבון תשלומים למנהל מקרקעי ישראל / ר.מ.י מאחר והם באים במקום עלויות קרקע במקרים של קרקע פרטית שהוצאו מהחשבון שכן אינן רלבנטיות להשוואה, מעבדה לבדיקת בטונים – מתקיימת בהן שונות גבוהה בצד גודל זניח למ"ר.

טבלה 8.6.6: פירוט עלויות הבנייה באומדן

עלויות	קונבנציונלי	מודולרי
בנייה (ישירות)	5,200 למ"ר ¹⁴	4,680 למ"ר ¹⁵
היטלי פיתוח אגרות בנייה	500 למ"ר ¹⁶	500 למ"ר
אגרת היתר	35 למ"ר ¹⁶	35 למ"ר
עו"ד	1.5% מערך הנכס ¹⁶	1.5% מערך הנכס
אדריכל	400 ₪ למ"ר ¹⁷	400 למ"ר
מהנדס בניין ¹⁸	70 ₪ למ"ר ¹⁷	70 למ"ר
חיבור חשמל	3,000 לדירה ¹⁹	3,000 ליחידת דיור ²⁰
פיגומים	25 למ"ר ²¹	אין
הובלה והנפה	100 300 למ"ר ²²	עלות הובלה והנפה של כל יחידה היא 7,500 מ"ר ²³ הובלה ימית – 2,500 ₪ ליח' מודולריות הובלה יבשתית ראשונה ליום – 2,500 ₪ ליחידה מודולרית הובלה יבשתית שניה ליום – 1,800 ליחידה מודולרית הנפה – 350 למ"ר הובלה יבשתית מהמפעל באירופה לנמל באירופה – 70% מהעלות בישראל ²⁴

¹⁴ הערכה בהתבסס על טווחים המופיעים במקורות שונים: אדריכלות ובנייה בישראל, בצת אילון בע"מ, דפי זהב

¹⁵ בהנחה של חיסכון של 10% בעלויות הכוללות של הבנייה. יחד עם זאת ראו ניתוח רגישות להנחות שונות לגבי המחיר.

¹⁶ אדריכלות ובנייה בישראל

¹⁷ שבלול – אתר רעיונות אדריכלות

¹⁸ בנוסף לאמור יש עלויות נוספות של יועץ קרקע, מודד, מכון התקנים וצילומי תוכניות בהיקף ממוצע לבניין של כ-19,000 ₪ כלומר, כ-2.5 למ"ר, סכום הנבלע בשולי החישוב.

¹⁹ "רכיבי עלויות הבנייה למגורים ומשקלם במחיר הדירה", משרד הבינוי והשיכון, 2015

²⁰ הנחנו כי עלויות עבור היטלי פיתוח ואגרות בנייה, אגרת היתר, עו"ד, אדריכל, מהנדס בניין, ועלות חיבור לחשמל בבנייה המודולרית ידמו לעלויות אלו בבנייה הקונבנציונלית, כיוון שאין סיבה שעלויות אלו יושפעו משיטת הבנייה

²¹ כולל הובלה והתקנה, מתוך מחירון פיגומים 2018 אצל עמית עוז שיפוץ בניינים

²² פורטל הובלות באביב

²³ חישוב של חברת תבור, על בסיס הנתונים הבאים: הובלה של מכולה מאירופה לישראל עולה 1,000-1,550 ₪ (ע"פ אתר yep). על סמך ייעוץ שקיבלנו מחברת תבל, וקבוצת מעיין, יש אפשרות לייבא את היחידות המודולריות באניות מטען, או בקונטיינרים פתוחים. הובלה כזו יקרה כיוון שגלומות בה עלויות נוספות שמטרתן לספק הגנה ליחידה בעת המסע הימי. לכן, הנחה סבירה היא כי הובלה של יחידה מודולרית תעלה כפול מהובלת מכולה – כ-2,500 ₪. עלויות ההובלה עבור יחידות מודולריות על סמך הצעת מחיר שקיבלנו מחברת תעבורה. מומחים מחברת מנופי אבי וחברת תעבורה טענו כי לא ניתן להגדיר מחיר עבור הנפה של יח' מודולרית ללא מפרט מפורט וללא בדיקת אתר העבודה העתידי. לכן לקחנו כהנחה סבירה שעלות ההנפה תעלה 350 ₪ למ"ר, המהווים 5% מעלות.

²⁴ סביר להניח כי הובלה מהמפעל באירופה לנמל האירופאי תעלה סדר גודל של המחיר בארץ, אך זול יותר. הנחנו כי מדובר ב-70% מהעלות בישראל

לאחר חישוב העלויות הנ"ל נמצא כי בבניין בן 20 קומות במאפיינים שתיארנו מעלה, העלות למ"ר בנוי בבניין קונבנציונלי היא 6,756 ₪ ובבניין מודולרי 6,516 ₪ למ"ר. בסך הכל, נמצא כי עלות כוללת של בניין בבנייה קונבנציונלית היא כ-68.11 מיליוני ₪, ועלות כוללת של בניין מודולרי היא כ-65.68 מיליון ₪. למרות עלויות ההובלה והשינוע הגבוהות יותר בבנייה המודולרית, הפער בעלויות הבנייה לטובת הבנייה המודולרית נובע בעיקר מעלות בנייה ישירה למ"ר נמוכה יותר, ואי-שימוש בפיגומים.

8.6.4.3 היזון ותזרים מזומנים

על מנת שההשוואה הכלכלית תהיה מלאה, יש להזון את זרמי המזומן הנוצרים משתי החלופות, בפרט שעיתוי זרמי מזומן אלה אינו אחיד. הבנייה הקונבנציונלית אמורה להימשך זמן רב יותר ולפחות בתחילת הדרך, אנו צופים כי השיווק של הבנייה המודולרית, ייקח יותר זמן ויותר מאמץ על מנת להגיע למכירה מלאה. מנגד שלבי התכנון והאישור בבנייה המודולרית לאחר שיתוקנו התקנות המתאימות, אמור לקחת פחות זמן שכן רמת אי הוודאות יורדת.

קיימת שונות גדולה בזמני הביצוע של כלל השלבים בין פרויקטים שונים. על בסיס ניסיון הבנייה המודולרית בעולם, מאפייני ענף הבנייה בישראל, ועל בסיס נתוני ספרות שהצגנו בפרקים הקודמים, מצאנו לנכון להניח את זמני הביצוע (בחודשים) המפורטים בטבלה 8.6.7.

חלק מהשלבים יתקיימו במקביל. להלן לוח הזמנים שאנו חוזים לפי רבעונים נתון בטבלה 8.6.8.

טבלה 8.6.7: זמני הביצוע המשמשים באומדן (בחודשים)

בנייה מודולרית	בנייה קונבנציונלית	
6	9	תכנון
18	24	אישורים וקבלת היתר בנייה
9	30	הכנת קרקע הקמה ובנייה
3	בתוך התהליך	הובלות
24	12	שיווק
3	6	חזות בניין וגמר סביבתי
63	81	סה"כ

לפי לוח הזמנים המוצע מעלה, משך פרויקט קונבנציונלי משלב התכנון ועד שלב מכירת הדירה יהיה 66 חודשים (5.5 שנים), ומשך פרויקט מודולרי יהיה 45 חודשים (3.75 שנים), המהווה קיצור של 32% ביחס לבנייה קונבנציונלית. מספר זה תואם לנתון שמצאנו בספרות²⁵, לפיו חיסכון בזמן מוערך בכ-30% עד 50% מזמן הבנייה בבנייה קונבנציונלית, כאשר ההערכות שלנו הן כי השיווק של בנייה

Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction" (Lawson & Ogden, 2005 ²⁵

מודולרית יהיה ארוך יותר מהרגיל לפחות בשנים הראשונות של החדרת הפרויקט לגביו מתבצע ניתוח זה.

טבלה 8.6.8: לוח זמנים חזוי לפי רבעונים עבור פרויקט האומדן

רבעון																טכנולוגיה							
2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1						
2025				2024				2023				2022				2021				2020			
																		קונבנציונלית					
																		תכנון					
																		אישורים					
																		הובלות					
																		הקמה ובנייה					
																		שיווק					
																		גמר					

רבעון																טכנולוגיה							
2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1						
2025				2024				2023				2022				2021				2020			
																		מודולרית					
																		תכנון					
																		אישורים					
																		הובלות					
																		הקמה ובנייה					
																		שיווק					
																		גמר					

8.6.4.4 ממצאי השוואה בין בנייה קונבנציונלית ובנייה מודולרית

בהתחשב בהנחות שהנחנו ובעלויות שמצאנו, השלמת בניין בבנייה קונבנציונלית תיקח 66 חודשים. על-פי נתוני התאחדות בוני הארץ (2018), עלות הקרקע מהווה כ-21% מסך מחיר המכירה של דירות בנות 4 חדרים טיפוסיות. לכן הוספנו לעלויות בניית בניין בבנייה קונבנציונלית, שמגיעות ל- 61.12 מיליון ₪, את עלות הקרקע, המהווה 30,240,000 ₪ (21% מ-144 מיליון ערך מכירת 80 דירות). הקרקע נרכשת לפני תחילת הפרויקט לכן אינה מהוונת. את העלות של 61.12 מיליון ₪ היוונו לפי אחוז היוון של 4% לשנה (ברק, ב. 2016). בתום התקופה קיבלנו כי עלות הפרויקט תעמוד על כ- 84

מיליון ₪. לעומת זאת, בבנייה מודולרית השלמת הבניין תיקח 45 חודשים. בהתחשב בעלויות בנייה כוללת של 58 מיליון ₪ בשנת 2019, באותם מחירי קרקע ואחוז היוון, מצאנו כי בתום התקופה עלות הפרויקט ליזם תעלה כ-83 מיליון ₪.

הנחנו כי דירת 4 חדרים בשטח 105 מ"ר תעלה באזור פתח תקווה או ראשון לציון 1,800,000 ₪. מכירת 80 דירות תוערך כיום (2019) בגובה של 144 מיליון. לשם חישוב הרווח היזמי החסרנו מהרווח המהוון ממכירת דירות בבניין בתום התקופה את חלק המע"מ (17%) ו-1% של מיסים (משרד הבינוי והשיכון 2015). מתוצאה זו החסרנו את העלויות המהוונות המוצגות בפסקה הקודמת. **בהנחות הנ"ל מצאנו כי היזם בבנייה המודולרית נהנה מרווח עודף של 3,344,247 ₪ ביחס לרווח של היזם בבנייה הקונבנציונלית.** חישוב הרווח היזמי נתון בטבלה 8.6.9.

טבלה 8.6.9: חישוב הרווח היזמי

בנייה מודולרית (חודשים, מיליוני ש"ח)	בנייה קונבנציונלית (חודשים, מיליוני ש"ח)	
45	66	זמן השלמת הבניין
88	92	עלויות בנייה ב-2019 (כולל קרקע)
90.5	90	עלויות בנייה בתום התקופה
144	144	רווח ממכירת הדירות ב-2019
115	113	רווח ממכירת הדירות בתום התקופה
31	28	סה"כ רווח ליזם ²⁶

8.6.4.5 החיסכון למשק

- לפי דוח MODCONS מצאנו כי עלות הבנייה הישירה מצטמצמת בכ- 3% בבנייה המודולרית ועלויות תכנון ועיצוב קטנות ב- 2%.
- כאמור, חיסכון בזמן מוערך בכ- 30%-50% מזמן הבנייה בבנייה קונבנציונלית. המשמעות הנגזרת היא חיסכון בעלויות המימון.
- בנייה מודולרית חוסכת את העלות של תיקונים ושיפוצים שלאחר סיום פרויקט, היכולים להגיע ל- 1%-2% מסך עלות הפרויקט (Rogan et al. 2000).

אם כך, בהתבסס על נתוני המחקר "רכיבי עלויות הבנייה למגורים ומשקלם במחיר הדירה"²⁷ המתוקננים ל-2019 ניתן לראות כי החיסכון הוא כנתון בטבלה 8.6.10.

²⁶ נציין רק כי יזמים רבים, בהעדר הון עצמי, עושים שימוש בקרנות הון הגובות בשל הסיכון העודף, ריבית מאוד גבוהה על מרכיב "ההון העצמי", עובדה השוחקת מאוד את הרווח נטו המושג בידי היזמים.
²⁷ (משרד הבינוי והשיכון 2015)

טבלה 8.6.10: אומדן החיסכון למ"ר למשק בבנייה מודולרית לעומת בנייה קונבנציונלית

סך חיסכון ש"ח	אחוז החיסכון	עלות למ"ר ש"ח	מרכיב בנייה	שלב בנייה
3	2%	148	עלויות תכנון	תכנון
		517	אגרות והיטלים, פיתוח תשתיות	אישורים
		133	מסים	
135	3%	4505	בנייה ישירה (עילי)	הקמה ובנייה + הובלות
		548	מרתפי חניה	
		26	חיבור חשמל	
130	35%	373	עלויות מימון	
		133	הנהלה וכלליות	
		338	פרסום ושיווק	שיווק
31		31	עלות תיקונים ושיפוצים לאחר מכירת הדירה	אחריות
300				סה"כ חיסכון למ"ר

סה"כ חיסכון למ"ר הוא כ-300 ש"ח. אנו חוזים כי מספר התחלות בנייה ממוצע לשנה בשנים 2018-2022 יהיה 55,600 דירות בשנה. שטח דירה ממוצע הוא כ-110 מ"ר, כך שהשטח הממוצע הצפוי להיבנות בשנה הוא 5,566,000 מ"ר. הנחנו כי מתוכם 5% בשנה ייבנו בבנייה מודולרית. במקרה כזה, בשנה יבנו 278,300 מ"ר בבנייה זו. אם נכפיל מספר זה בחיסכון למ"ר, נמצא כי החיסכון למשק הוא 83,274,257 ש"ח. מתוכם, המדינה תאבד 14,156,624 ש"ח כעלויות מע"מ.

8.6.5 ניתוחי רגישות

מאחר ויש מספר משתנים שעשויה להיות להם השפעה על ההשוואה בין הטכנולוגיות השונות, אולם משתנים אלה אינם ידועים בוודאות, ביצענו ניתוח רגישות דו-משתני על מנת לבחון את תוצאות ההשוואה ביחס לערכים שונים של משתנים אלה. המשבצות הצהובות בכל הטבלאות בהמשך מסמנות את הנחות האומדן בפרקים הקודמים.

הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה זו, ועלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה קונבנציונלית²⁹ נתון בטבלה 8.6.11.

²⁸ תחזית על פי נתוני בנק ישראל

²⁹ עלות מ"ר בבנייה מודולרית זולה ב-10% ביחס למ"ר בבנייה הקונבנציונלית בכלל המקרים

טבלה 8.6.11: הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה

למ"ר בשני סוגי הבנייה

עלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה מודולרית (ש)						
5400	4950	4680	4500	4050		
-8,679,324	-4,776,380	-2,434,614	-873,436	3,029,508	4500	עלות מרכיב
-4,551,566	-648,622	-1,693,144	3,254,322	7,157,266	5000	הבנייה למ"ר
-2,900,463	-1,002,48	3,344,247	4,905,425	8,808,369	5200	בבנייה
-423,809	3,479,135	5,820,902	7,382,079	11,285,023	5500	קונבנציונלית
3,703,949	7,606,893	9,948,660	11,509,837	15,412,781	6000	(ש)

המשבצות האדומות מסמנות את המקרים בהם הבנייה בשיטת המודולרית אינה כדאית ליזם ביחס לבנייה הקונבנציונלית. בטבלה ניתן לראות שבהנחה שעלויות בנייה ישירה עבור מ"ר בבנייה מודולרית יהיו זולות ב-10%, בנייה זו תהיה רווחית יותר ליזם בכל רמת עלות בנייה ישירה של מ"ר בבנייה קונבנציונלית (שמוצגת בטבלה).

הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה זו ביחס למ"ר בבנייה קונבנציונלית, ובעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה קונבנציונלית נתון בטבלה 8.6.12.

הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה זו ביחס למ"ר בבנייה קונבנציונלית, ובעלות ההובלה הימית הכוללת ליחידה מודולרית נתון בטבלה 8.6.13.

טבלה 8.6.12: הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה זו ביחס למ"ר בבנייה קונבנציונלית, ובעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה קונבנציונלית

עלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה מודולרית ביחס לבנייה קונבנציונלית								
105%	100%	95%	90%	85%	80%	75%		
-2,910,043	-915,205	1,079,633	3,074,471	5,069,309	7,064,147	9,058,985	4,600	עלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה קונבנציונלית (ש)
-3,080,314	-998,744	1,082,826	3,164,396	5,245,966	7,327,537	9,409,107	4,800	
-3,250,585	-1,082,283	1,086,019	3,254,322	5,422,624	7,590,926	9,759,228	5,000	
3,420,856	-1,165,821	1,089,213	3,344,247	5,599,282	7,854,316	10,109,350	5,200	
-3,591,127	-1,249,360	1,092,406	3,434,173	5,775,939	8,117,706	10,459,472	5,400	
-3,761,397	-1,332,899	1,095,600	3,524,098	5,952,597	8,381,095	10,809,594	5,600	
-3,931,668	-1,416,438	1,098,793	3,614,024	6,129,254	8,644,485	11,159,715	5,800	

טבלה 8.6.13: הרווח העודף ליזם הבונה בשיטת הבנייה המודולרית כתלות בעלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה זו ביחס למ"ר בבנייה קונבנציונלית, ובעלות ההובלה הימית הכוללת ליחידה מודולרית

עלות מרכיב הבנייה למ"ר בבנייה מודולרית ביחס לבנייה קונבנציונלית								
105%	100%	95%	90%	85%	80%	75%		
-2,760,040	-505,006	1,750,029	4,005,063	6,260,097	8,515,132	10,770,166	4,500	עלות כוללת של הובלה ימית של יחידה (ש)
-2,980,312	-725,278	1,529,757	3,784,791	6,039,825	8,294,860	10,549,894	5,500	
-3,200,584	-945,549	1,309,485	3,564,519	5,819,553	8,074,588	10,329,622	6,500	
-3,420,856	-1,165,821	1,089,213	3,344,247	5,599,282	7,854,316	10,109,350	7,500	
-3,641,128	-1,386,093	868,941	3,123,975	5,379,010	7,634,044	9,889,078	8,500	
-3,861,400	-1,606,365	648,669	2,903,703	5,158,738	7,413,772	9,668,806	9,500	
-4,081,672	-1,826,637	428,397	2,683,431	4,938,466	7,193,500	9,448,534	10,500	

ניתן לראות בבירור כי כאשר עלות ישירה של מ"ר בבנייה מודולרית זולה ב-10% או יותר, בנייה בשיטה זו רווחית יותר. הוזלה של 5% בלבד או מקרים בהם העלות הישירה של מ"ר בבנייה מודולרית שווה או אף יקרה מהעלות הישירה למ"ר בבנייה קונבנציונלית, מביאים למצב בו הבנייה המודולרית פחות רווחית ליזם.

עלות ההובלה הימית ליח' מודולרית מהווה נעלם במשוואה שלנו, ועלות זו יכולה להשתנות בטווח יחסית רחב. עלות הובלה של מכולה לדוגמא, עולה בין 1,000-1,550 ₪³⁰. היחידות בבנייה המודולרית רחבות יותר ממכולות, וברור שלא ניתן לייבא יחידות מודולריות במכולות, אך ניתן לייבא את היחידות המודולריות באוניות מטען. הובלה כזו יקרה יותר כיוון שגלומות בה עלויות נוספות שמטרתן לספק הגנה ליחידות בעת המסע הימי. באומדן הראשי הנחנו, כאמור, שכלל העלות של הובלות והנפות ממפעל הייצור בחו"ל ועד לאתר העבודה בישראל של יח' מודולרית תעלה כ-7,500 ₪.

בניתוח הרגישות כתלות בעלות ההובלה רואים, כמו בניתוח הקודם, שהבנייה המודולרית רווחית יותר ברמת 10% חסכון בעלויות בנייה ישירה ומעלה, וגם ברמת רווחית ברמת חסכון של 5% ומטה. מבחינת עלות ההובלה – ניתן לראות את גודל ההשפעה של עלות ההובלה. מדובר ב-270 יח' שיש לייבא עבור בניית 80 דירות המורכבות מ-3 יחידות מודולריות כל אחת. כך לדוגמא ניתן לראות שגם במקרה בו עלות ההובלה הימית יורדת ל-4,500 ₪ בלבד ליחידה, ירידה זו אינה מספיקה במקרה בו רמת החיסכון בעלות הבנייה הישירה יורדת מ-10% ל-0%.

הרווח העודף ליזם הבונה בבנייה המודולרית כתלות באחוז ההיוון השנתי נתון בטבלה 8.6.14, וכתלות במחיר מכירת הדירה בטבלה 8.6.15.

באומדן בפרקים הקודמים הנחנו כי דירת 4 חדרים בשטח 105 מ"ר, הנמצאת בפתח תקווה או ראשון לציון, תעלה 1,800,000 ש. מחיר זה יכול להשתנות מאוד ביחס למיקום הגאוגרפי בו מתבצעת הבנייה. מטבלה זו ניתן לראות את השתנות הרווח ליזם כתלות במחיר הדירה.

טבלה 8.6.14: הרווח העודף ליזם הבונה בבנייה המודולרית כתלות באחוז היזון השנתי

הרווח העודף ליזם בבנייה המודולרית (ש)	אחוז היזון שנתי
3,713,663	2.0%
3,611,095	2.5%
3,515,541	3.0%
3,426,690	3.5%
3,344,247	4.0%
3,267,929	4.5%
3,197,463	5.0%
3,132,590	5.5%
3,073,060	6.0%

טבלה 8.6.15: הרווח העודף ליזם הבונה בבנייה המודולרית כתלות במחיר מכירת הדירה

הרווח העודף ליזם בבנייה המודולרית (ש)	מחיר מכירת דירה
2,847,710	1,400,000
3,095,978	1,600,000
3,344,247	1,800,000
3,592,516	2,000,000
3,840,785	2,200,000
4,089,053	2,400,000
4,337,322	2,600,000
4,585,591	2,800,000

8.6.6 תועלות נוספות למשק

8.6.6.1 תועלות הבנייה המודולרית כבנייה ירוקה³¹

- **צמצום פסולת** - בנייה חדשה למגורים מייצרת בממוצע כ-20 טונות פסולת על כל 100 מ"ר בנוי. בכל שנה כ-17% מפסולת הבניין מועברים לאתרי סילוק, 58% מועברים למפעלי מחזור, וכ-25% מסולקים באופן לא מוסדר לסביבה ויוצרים מפגעים קשים, ביניהם זיהום מי תהום, זיהום אוויר, פגיעה נופית, התרבות מזיקים ואבדן שטחי קרקע ושטחים פתוחים³². בבנייה רגילה הפסולת באתר העבודה מהווה כ-10% עד 15% מסך החומר המגיע לאתר. בבנייה מודולרית הפסולת הזו מופחתת בכ-60% עד 95% (MODCONS 2015, Aye et al. 2012). כלומר, בהערכה שמרנית 60% מהפסולת תצטמצם – הבנייה המודולרית תייצר 8 טון פסולת על כל 100 מ"ר בנוי בלבד (לעומת 20).

Table 6
Wastage rate of typical building material.

	Conventional construction			Prefabrication
	Blengini (2009)	Poon et al. (2001)	Tam et al. (2007)	
Concrete	7%	3–5%	4–7%	0.5–3.5%
Steel bar	7%	1–8%	3–8%	0.2–4%
Timber	7%	5–15%	4–23%	0.6–12%
Block/brick	10%	4–8%	5–8%	0.6–4%

בטבלה, המצוטטת למעלה מ- (Hong et al. 2018), ניתן לראות שאחוזי הפסולת בבנייה טרומית נמוכים משמעותית משיעור הפסולת בבנייה קונבנציונלית.

- **כיום, קיימת תופעה של השלכת פסולת בלתי חוקית – לפי האומדנים הקיימים בידי המשרד להגנת הסביבה (המשרד להגנת הסביבה 2017), כ-0.9 מיליון טון פסולת בניין, המהווים כרבע מסך פסולת הבניין השנתית המיוצרת היום, אינם מגיעים לאתרי קצה מוסדרים, אלא מושלכים בשטחים הפתוחים. ההשלכה הכספית של תהליך זה היא משמעותית: בכפוף לעלות הטיפול בטון פסולת ותחת ההנחה שבכל שנה מושלכים בשטחים פתוחים כ-900,000 טון פסולת בניין בממוצע, בכל שנה נצבר נזק של 63 מיליון ₪. בהנחה האמורה לעיל ש-5% מכלל התחלות הבנייה החדשות ייבנו בבנייה מודולרית; ובצירוף ההנחות שבכל שנה מושלכים בשטחים פתוחים כ-900,000 טון פסולת בניין בממוצע שעולה 63 מיליון ₪ למשק; ושלבנייה מודולרית הפסולת תצטמצם ב-60%, מתקבל שערך החיסכון למשק הוא 1,890,000 ₪ בשנה.**

³¹ (כרמון, ע. 2015)

³² המשרד להגנת הסביבה, "פסולת הבניין בישראל – ממטרד למשאב"

8.6.6.2 חיסכון בחיי אדם וצמצום תאונות עבודה

מעבר לערך המוסרי בשמירת חיי אדם, יש לתאונות עבודה בענף הבנייה גם מחיר כלכלי ברמת המשק. העלות הכלכלית של תאונות עבודה הינה מאתגרת למדידה. בספרות, מקובלת ההנחה שחברות בנייה מתקשות לבצע הערכה מדויקת של כלל העלויות הנגרמות עקב תאונות עבודה. אם וכאשר מתבצעת הערכה כזו, היא נוטה להיות הערכת חסר ביחס לעלות האמתית. להלן כמה נתונים אודות תאונות בענף הבנייה בישראל³³:

- בשנת 2016, שילם המוסד לביטוח לאומי כ-4.5 מיליארד ₪ בגין תאונות עבודה. ב-2016 מספר מקבלי דמי פגיעה בענף הבינוי היה 16.36 לכל 1,000 איש המועסקים בבינוי. התשלום הממוצע לנפגע בענף הבינוי עמד ב-2015 על 6,680 ₪.
- בתום שנת 2016 עסקו בענף הבנייה כ-244 אלף עובדים כאשר מתוכם כ-187 אלף מועסקים ישראלים (מהווים כ-77% מסך המועסקים) כ-48 אלף עובדים פלסטיניים (כ-20%) וכ-9 אלף עובדים זרים (כ-3%). העובדים הזרים והפלסטיניים מועסקים בעיקר בעבודות הרטובות של הענף (טיח, ריצוף, ברזלנות וטפסנות) (משרד העבודה והרווחה, הביטוח הלאומי 2017).
- בשנת 2016 נהרגו 58 בני-אדם בתאונות עבודה. מתוכם, 35 הרוגים בענף הבנייה.
- 61% מתאונות העבודה הקטלניות בענף הבנייה התרחשו באתרי בנייה למגורים בשנת 2016.
- הסיבות העיקריות להתרחשות תאונות קטלניות הן: נפילה מגובה (64% ב-2016), נפילה או פגיעה של חפץ נע (18% ב-2016), התמוטטות או קריסה של מבנה (12%) והתחשמלות (6%).
- 76% מהתאונות התרחשו בפרויקטים חדשים, לעומת 24% בשיפוצים של מבנים קיימים.
- בשנת 2015 הביטוח הלאומי שילם כ-70 מיליון ₪ כדמי פגיעה לנפגעי תאונות עבודה בענף.

לנוכח הנתונים הללו, קל לראות שבנייה מודולרית תשפיע באופן ישיר לטובה על נתוני תאונות העבודה בישראל:

- **פחות כוח אדם באתר** - לפי דוח MODCONS, הבנייה המודולרית יכולה לצמצם את כוח האדם באתר העבודה עד ל-50%. צמצום כוח העבודה באתר יקטין באופן טבעי גם את הכמות האבסולוטית של תאונות העבודה.
- **פחות עבודות מסוכנות** - תהליך הבנייה המודולרית מעצם מהותו מצריך פחות פעולות מסוכנות מצד כוח האדם באתר. כך לדוגמא, מרבית התאונות הקטלניות נגרמות מנפילה מגובה. מעבר לבנייה מודולרית מצמצם את הצורך בעבודה בגובה.
- **אי-שימוש בפיגומים** (Rogan et al. 2000) – לפי משרד העבודה והרווחה³⁴ שימוש תקין בפיגומים יביא לחיסכון בחיי אדם ופגיעות בגוף (של מרכיבי ומפרקי הפיגומים, של העובדים

³³ ד"ח תאונות עבודה ותחלואה תעסוקתית (2016), מינהל הבטיחות והבריאות התעסוקתית
³⁴ משרד העבודה, הרווחה, והשירותים החברתיים, הליך הערכת השפעות רגולציה (RIA) - שיפור הבטיחות בפיגומים בישראל

על הפיגומים, ואף של עוברי האורח). בשנים 2017-2018, 30% מהתאונות הקטלניות היו נמנעות לו היה מותקן במקום פיגום תקין ותקני, ולמעשה כ-8 חיי אדם היו נחסכים בכל שנה. בהנחה שאחוז זהה גם באשר לתאונות במעורבות פיגום שהביאו לפציעה, הרי שמדובר על מניעת פציעתם של כ-1,680 בני אדם (ממוצע הנפצעים בענף הבנייה על פי נתוני הביטוח הלאומי הוא 5,600 בשנה). כיוון שבבנייה מודולרית בה היחידות מגיעות עם החזית המוגמרת אין שימוש בפיגומים, נניח כי השפעת המעבר לשיטת הבנייה המודולרית תביא לתוצאה דומה לזו של שימוש בפיגומים תקינים בלבד, כפי שהגדיר משרד העבודה והרווחה. אם כך, באתר עבודה בבנייה מודולרית אמורים להיחסך 30% מהתאונות הקטלניות ומניעת פציעתם של 30% מסך הפציעות.

- במאמר של Lawson, Ogden & Bergin מ-2011, אף מצאו כי בבנייה מודולרית הבטיחות באתר העבודה ובמפעל השתפרה, ואחוז תאונות העבודה המדווחות הצטמצמו ב-80%.

על סמך נתונים אלו, נחשב את הפגיעה במשק ואת החיסכון האפשרי ממעבר לבנייה מודולרית: מתוך 187 אלף מועסקים ישראלים בענף הבינוי – מקבלי דמי הפגיעה בענף הבנייה הם כ-3,059 בני אדם, כאשר גובה התשלום שלהם לשנה הוא כ-20.4 מיליון ₪.

8.6.6.3 סך חיסכון שנתי

סיכום מרכיבי החיסכון בשל התהליך מביא אותנו להערכת מינימום כנתון בטבלה 8.6.16.

טבלה 8.6.16: הערכת מינימום של החיסכון למשק מהקטנת פסולות והגברת הבטיחות בעבודה בזכות בנייה מודולרית

סעיף	סכום במיליוני ₪ לשנה	הערות
חיסכון בשל הקטנת כמויות פסולת	1.9	
חיסכון מהקטנת אובדן חיי אדם ופציעות	20.4	
סך חיסכון שנתי ממעבר לבנייה מודולרית	22.3	בשיעור של 5% מכלל התחלות הבנייה

8.6.6.4 פתרון מצוקת הדיור

על פי תחזיות הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, בשנת 2065 תמנה אוכלוסיית ישראל 15.8 מיליון תושבים בהתאם לתרחיש הנמוך, ו-25 מיליון תושבים בהתאם לתרחיש הגבוה. שני התרחישים עלולים להחמיר את הבעיות מהן אנו סובלים כבר היום, כמו מצוקת דיור, פקקים ועומס תשתיות. צרכי הבינוי בישראל מכתובים שעד שנת 2023 ייבנו בישראל מעל ל-400,000 יחידות דיור (להלן: יח"ד)

נוספות, ועד שנת 2035 יצטרפו כ- 1,120,000 יח"ד חדשות. מספר זה מהווה מחצית מכלל יח"ד הקיימות כיום. במילים אחרות, על כמות הבינוי בישראל לגדול בכ-50% בפרק זמן קצר - עד לשנת 2030.³⁵

כאמור, לפי הספרות החיסכון בזמן בבנייה המודולרית מוערך בכ-30% עד 50% מזמן הבנייה בבנייה קונבנציונלית (Lawson and Ogden 2011). לאור הביקוש הגובר לדירות בישראל, מעבר לשימוש בשיטת בנייה מודולרית נראה כפתרון מהיר, יעיל וכדאי כלכלית שיענה על הצרכים הלאומיים של ישראל.

בנוסף, בתנאי השוק הנוכחיים זמני הבנייה ארוכים בכ-20% בשל מחסור בכוח אדם (משרד הבינוי והשיכון 2016). מעבר לבנייה מודולרית מצריך שימוש בפחות כוח אדם, שעיקרו מיובא והוא בעל נטל עודף עקיף וכמובן קיצור זמני העבודה.

8.6.7 ייבוא המודולים אל מול ייצור מקומי

8.6.7.1 שאלת הבסיס

השאלה, עד כמה הצלחת ההחדרה של טכנולוגיית בנייה מודולרית תלויה בייצור מקומי אל מול יבוא? חובקת בתוכה מספר שאלות משנה. בעת שמדברים על יזמים שירצו לבנות דירות בבנייה מודולרית, ניתן לשאול האם חלקם היו מוכנים לשקול בנייה כזו אילו האספקה הייתה נעשית מספק מקומי, לנוכח העובדה שההובלה הימית, מורכבת מבחינה לוגיסטית, יקרה ועלולה אף לפגוע בתכנון לוחות הזמנים? שאלות נוספות הן, באיזו מידה יש היגיון שהממשלה תתמוך בייצור כזה. האם ניתן להצביע על יתרון מובהק של אספקה מייצור מקומי על אספקה מיבוא, גם במקרה ויש הוכחות חותכות לגבי יתרון לבנייה מודולרית?

בטבלה 6.8.17 נתון ריכוז יתרונות מול חסרונות בייצור מקומי מול יבוא. בהמשך ניגע בסוגיות ספציפיות שונות אשר הטבלה מתרכזת רק בעיקריהן.

8.6.7.2 בעיית כוח האדם

נכון ל-2019, ישראל נהנית ממצב המוגדר כתעסוקה מלאה. לפי הלמ"ס, בפברואר 2019 הייתה בישראל אבטלה של 4.1% בלבד. במקביל, המשק הישראלי סובל ממחסור חמור בעובדים בחלק מהענפים, ביניהם ענפי התעשייה והבנייה.

בעבר (שנות השמונים) מילאו את המחסור הללו עובדים מהרשות הפלסטינית. אך בעקבות האינתיפאדה הראשונה הממשלה נקטה במדיניות של "החלפת" הפלסטינים בעובדים זרים (קמפ

³⁵ חדשנות בענף הבנייה בישראל

ורייכמן 2008). העובדים הזרים מועסקים בישראל לפי מכסות מיוחדות שמאשרת הממשלה. יש לציין שהמכסות קיימות בענפים מסוימים בלבד: חקלאות, סיעוד ובנייה³⁶.

טבלה 8.6.17: ריכוז יתרונות מול חסרונות בייצור מקומי מול יבוא

יתרונות	חסרונות	
נתפס כגורם חיובי מבחינת המדיניות הכלכלית	המשק סובל מבעיית כוח אדם, בעיקר בענפי התעשייה. לא בטוח שניתן יהיה לאייש בשכר סביר את המפעל. גם כיום יש מחשבה על יבוא עובדי תעשייה	תעסוקה
	צפוי חיסרון לגודל	עלויות ייצור
	צפוי חיסרון למגוון בגלל שוק מוגבל וגודל מפעל מוגבל	מגוון
	ייקח זמן להגיע לאיכות ייצור של מפעלים ותיקים בתחום. בעיות איכות תפגענה בתפקוד המוצר ובשיווקו	איכות
		זמני אספקה
	צפויים להיות קצרים יחסית	
	מאחר ואין פריקה של אונייה גדולה, הרי אפשר לספק לאתר הבנייה את היחידות המוגמרות בקצב הייצור המותאם לדרישה באתר וללא נוצר צורך באחסון	לוגיסטיקה
	קל יותר לשלוט במרכיבים שונים	התאמה לצרכים

- **מחסור בכוח אדם בתעשייה** - לפי התאחדות התעשיינים (2018), התעשייה הישראלית סובלת ממחסור חמור של אלפי עובדים; על פי נתוני סקר ציפיות של התאחדות התעשיינים, כ-80% מכלל המעסיקים מצביעים על קושי בגיוס עובדים מקצועיים, וכ-33% מכלל המעסיקים מצביעים על קושי גדול בגיוס עובדים מקצועיים. בין השנים 2017-2026 הצפי הוא שיפרשו

³⁶ הכנסת, סוגיות בהעסקה של עובדים זרים בישראל, 2015

מהתעשייה כ-74 אלף עובדים. בתעשייה חסרים עובדים במגוון מקצועות ובכלל הרמות; החל מעובדי רצפת ייצור, דרך טכנאים והנדסאים וכלה במהנדסים. חלק מהמקצועות מאופיינים בעבודה ברצפת הייצור וסביבת עבודה קשה. במקצועות אלה קיים קושי בגיוס עובדים ישראלים. חברת תבור ערכה סקר³⁷ בנושא מחסור בהון אנושי בתעשייה עבור התאחדות התעשיינים, במסגרתו עלה כי קיים מחסור בעובדים הן בתעשייה, והן בייצור מתקדם. עובדי ייצור בלתי מקצועיים מהווים את המחסור החמור ביותר. בגדר המקצועות, בעלי המקצועות החסרים ביותר הם רתכים ומסגרים.

כבר במצב הקיים ישנו מחסור חמור בכוח אדם בתעשייה, אשר בחלק מהמקרים גורם לנזקים כלכליים של ממש, באובדן הזמנות והפסדים כספיים. לכן, אנו מאמינים כי מפעל מקומי לייצור יחידות מודולריות בישראל יתקשה לגייס עובדים. מחד, מפעל כזה יתקשה לגייס עובדים ישראלים, ומאידך, לא יהיה באפשרותו לגייס עובדים זרים או להסתמך על העסקת פלסטינים. ישראל מזמנת עובדים זרים לענפי הסיעוד, החקלאות והבניין בלבד. לכן, נראה שהעסקת עובדים זרים אינה אפשרית במפעל תעשייתי. בנוסף, יהיה קושי להעסיק פלסטינים במפעל, מכיוון שהעסקתם מוגבלת בשעות פתיחת המחסומים ומלווה בבירוקרטיה רבה.

- **ענף הבניין** - במשק ישנן 3,019 משרות פנויות של רצפים, סתתים, טיחים, מסגרים, ועובדי שלד בתחום הבנייה. בנוסף, ישנן 2,640 משרות פנויות של בוני בתים, בנאים ויוצקי בטון³⁸. ענף הבנייה בישראל סובל ממחסור חריף בעובדים³⁹. העובדים הישראלים נרתעים מהענף – עם עליית רמת החיים בישראל, היו פחות ישראלים שהיו מוכנים לעבוד בעבודות D3 (Dirty Dangerous and Demeaning) (קמפ ורייכמן 2008). בתום שנת 2016 עסקו בענף הבנייה כ-244 אלף עובדים, כאשר מתוכם כ-187 אלף מועסקים ישראלים (מהווים כ-77% מסך המועסקים) כ-48 אלף עובדים פלסטיניים (כ-20%) וכ-9 אלף עובדים זרים (כ-3%). העובדים הזרים והפלסטיניים מועסקים בעיקר בעבודות הרטובות של הענף (טיח, ריצוף, ברזלנות וטפסנות). העובדים הישראלים הם לרוב ערבים-ישראלים (התאחדות בוני הארץ ו-BDO 2016).
- המדינה מנסה להתמודד עם המחסור הזה על-ידי הבאת עובדים זרים והעסקת פלסטינים. כך לדוגמה, בשנים האחרונות נחתמו הסכמים בילטרליים להבאת עובדים זרים לענף הבנייה עם: מולדובה, בולגריה, רומניה, סין ואוקראינה. הסכמים אלו מאפשרים למדינת ישראל לגייס עובדים זרים מיומנים לעבודה בענף הבניין, במקצועות האלה: טפסנות, ברזלנות, רצפות וטיחות, שכן במקצועות הללו קיים מחסור ניכר בעובדים מיומנים (משרד הבינוי והשיכון 2016). עם זאת, מהלך זה נכשל: במהלך השנים 2017-2018 במקום 20 אלף פועלים סינים הגיעו בקושי 5,000, ומתוך 1,000 פועלים אוקראינים שהמדינה אישרה את הבאתם לישראל, הגיעו 150 בלבד³⁸.

³⁷ תבור, דוח עבור התאחדות התעשיינים, מחסור בהון אנושי בתעשייה - ממצאי סקר וניתוח, 2018.
³⁸ קלינגביל, סיוון, "אנשים מקבלים משכורות גבוהות מאוד, אפילו בלי ניסיון – למה לא אני? המציאות מאחורי נתוני האבטלה הנמוכים", דה מרקר, 20.4.2019.
³⁹ פטרסבורג עופר, למרות ההצהרות: מחסור של אלפי עובדים בענף הבנייה, 3.2.19, ynet.

מאמצי המדינה אינם מספיקים. אלדד ניצן, יו"ר התאחדות כוח אדם בענף הבנייה⁴⁰, מדווח על קשיים נוספים שאיתם מתמודדים בענף הבנייה: העובדים הפלסטינים עובדים מספר מופחת של שעות, כיוון שיש שעות מסוימות בהן נסגרים המחסומים בגבולות. בנוסף, הם לא מיומנים בבנייה לגובה.

לנוכח הנתונים הללו, מעבר לבנייה המודולרית יכול להיטיב עם תפוקות ענף הבנייה הסובל ממחסור חריף בעובדים, כיוון שטכנולוגית הבנייה המודולרית מצמצמת את כוח האדם באתרי הפרויקטים (MODCONS 2015). עם זאת, אנו חוזים כי לאור נתוני התאחדות התעשיינים וממצאי סקר תבור יהיה קושי רב למצוא כוח עבודה מיומן ולא מיומן להעסקה בייצור מקומי של יחידות מודולריות, ולכן נראה שישנה עדיפות, לפחות בשלב ההתחלתי, לאפשרות הייבוא של היחידות המודולריות מחו"ל לעומת הקמת מפעל מקומי.

8.6.7.3 כדאיות כלכלית של הקמת מפעל בישראל

על-מנת להבין את סדר הגודל של הקמת מפעל יצור מודולרי בישראל, בחנו מפעלים קיימים מסביב לעולם ואת תפוקותיהם, כנתון בטבלה 8.6.18⁴¹.

בחינת הקמת מפעל בישראל

- **גודל ומיקום** – נראה שכלל המפעלים תופסים שטח גדול למדי. המפעלים בדרך כלל ממוקמים אסטרטגית ליד כביש ראשי, מסילת רכבת, או נמל. בעבודה זו נבחנת האפשרות של בנייה מודולרית בערים הגדולות של ישראל כגון ראשון-לציון, פתח תקווה או נתניה. מדובר באזורים מתועשים שיהיה קושי רב לבנות בקרבתם מפעל בשטח כה גדול. מיקום המפעל בפריפריה בצמוד לאתר עבודה ליד ערים כמו ירוחם או עפולה לא יניבו לקבלנים את התשואה הנדרשת, מכיוון שמחירי הדירות בפריפריה נמוכים יותר. מסקנתנו היא כי לא ניתן למקם מפעלים בגודל הדרוש במיקום המבוקש.
- **עלות שכר** – חלק מהמפעלים האירופאיים הקיימים (לייצור מודולים) ממוקמים כיום בליטא ובפולין, כאשר הם מייצאים את המודולים למדינות הסקנדינביות ולארצות הברית. הנחת העבודה שלנו היא כי ניתן להסביר מצב זה על-ידי עלות המעסיק הנמוכה שקיימת במדינות אלו, לעומת מדינות היעד. משמע, הוצאות שכר יותר נמוכות. אם נבחן את ישראל, נגלה כי הוצאות השכר בישראל הן גבוהות למדי, כפי שרואים מהגרף המצוטט בהמשך מנתוני ה-OECD. מחד, שכר המינימום בישראל הוא לא מהנמוכים בעולם, מה שעתיד לייקר את עלויות הייצור. חברת Astel Modular שסקרנו מעלה היא חברה שוודית, שבחרה למקם את הייצור שלה באסטוניה. ניתן לראות ששכר המינימום האסטוני קטן משמעותית משכר המינימום הישראלי.

⁴⁰ יעקבי-הנדלסמן היאלי, מכתב חריף לכחלון: "מחסור בעובדי בנייה גורם לתאונות", 29.2.19, ישראל היום.
⁴¹ יש לציין שהיה קושי באיסוף נתונים כיוון שמדובר בחברות פרטיות. פנינו אל כלל החברות במייל או באתר, רובן לא נענו.

טבלה 8.6.18: מאפיינים של מספר מפעלים בעולם

שם מפעל	מספר עובדים	שטח מפעל (מ"ר)	מיקום מפעל	תפוקה	הערות נוספות
Astel Modular ⁴²	75	8,000	אסטוניה, ליד כביש ראשי		
Simplex Homes			ארה"ב		לחברה סניפים רבים (ארה"ב): New Hampshire, Vermont, Massachusetts, New York, Rhode Island, Connecticut, New Jersey, Pennsylvania, Delaware, West Virginia, Maryland, Virginia
Totally Modular ⁴³		4200	בריטניה, בפריפריה	800 יחידות בשנה עבור מפעל בודד, עד 2,000 יחידות בשנה לשני המפעלים	לחברה שני מפעלים בבריטניה. המתקן שמייצר 800 יחידות בשנה מתפרס על גודל של 45,000 רגל רבוע
Concept Modular ⁴⁴		3,500	מזרח סין, קרוב לים	450,000 מ"ר	שטח המפעל 38,000 רגל רבוע
Factory Os ⁴⁵	300	גודל של מגרש כדורגל - 7,200 מ"ר ⁴⁶	עיר בפריפריה של סן פרנסיסקו ⁴⁷		עלות השכר השנתית לעובד היא \$60,000. משמע, השכר החודשי הממוצע עומד על 5 אלפי \$, גבוה פי 3 משכר המינימום בישראל, בזמן ששכר המינימום בארה"ב נמוך משכר המינימום בישראל.

⁴² <https://astelmodular.com/>

⁴³ <http://totallymodular.co.uk/our-solutions/manufacturing/>

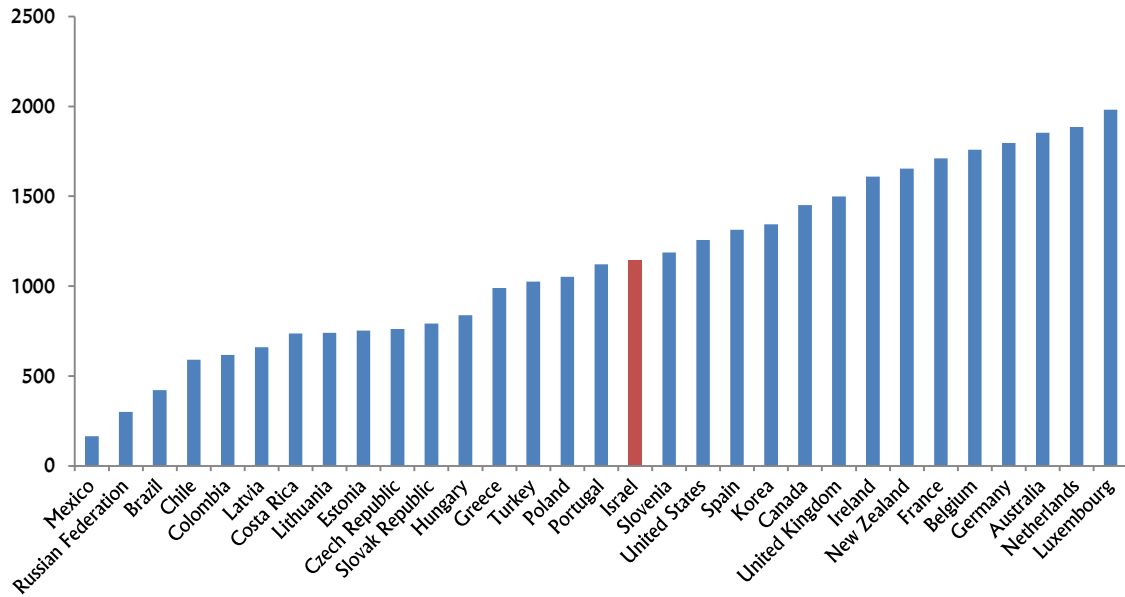
⁴⁴ <http://www.concept-modular.com/>

⁴⁵ <https://factoryos.com/>

⁴⁶ ע"פ ויקיפדיה גודל של מגרש כדורגל הוא כ-7,140 מ"ר

⁴⁷ Dougherty Conor, Piece by Piece, a Factory-Made Answer for a Housing Squeeze, The New York Times, June 7, 2018.

שכר מינימום חודשי בדולרים, 2017



מאידך, מתוקף המחסור הקיים בכוח אדם, אודותיו הרחבנו מעלה, אנו מניחים כי על-מנת לגייס עובדים יהיה צורך להציע משכורות הגבוהות משכר המינימום. כפי שכבר ראינו למעלה, מצב דומה קיים בחברת Factory Os שבארה"ב: עלות השכר השנתית לעובד היא \$60,000. משמע, השכר החודשי הממוצע עומד על 5 אלפי \$, גבוה פי 3 משכר המינימום בישראל, בעוד ששכר המינימום בארה"ב נמוך משכר המינימום בישראל.

אם כך, בין אם ישראל תשלם שכר גבוה ובין אם תשלם לעובדי המפעל שכר מינימום, נראה כי כלל לא וודאי שהיבוא של המודולים לישראל הוא פחות יעיל כלכלית מייצור מקומי, ואף להיפך.

- מוגבלות של גודל התעשייה המקומית** - על מנת לפתח תעשיית ייצור יחידות מודולריות אפקטיבית מקומית, נדרש גיוון בייצור היחידות, דבר המצריך בתורו מחזורים גבוהים למפעל. אי אפשר לבנות את הענף על מודל יחיד, כיוון שייצור מוגבל שכזה לא יענה על צרכי הבנייה המקומית. אמנם הקמת מפעל מקומי תחסוך הובלות ימיות ויבשתיות, אך נראה שמחיר אחזקת המפעל בישראל הוא גבוה מדי. לשם כך המפעל הישראלי יצטרך להעסיק מומחים זרים, כיוון שאין מומחים ישראלים לבנייה מודולרית לגובה בישראל. בעיה דומה קיימת גם בסין (Hong et al. 2018): אחד המרכיבים המעלים את היוקר של הבנייה המודולרית כמו גם את הייצור של היחידות הוא הצורך במומחים בתחום.

מכל מקום, על מנת לנסות ולהעריך את כדאיות הקמתו של מפעל כזה בישראל נוכח צרכי השוק, נדרשת עבודה מקיפה הכוללת בין היתר נתונים מדויקים יותר אודות עלות הקמת המפעל, היכולת לתת מענה למודלים שונים, והחזר ההשקעה. בשלב זה אנו ממליצים לייבא את היחידות המודולריות מחוץ לארץ. רק לאחר בחינת הצלחה של בנייה בטכנולוגיה המודולרית בישראל, יהיה מקום לבחון האם ישנו הגיון כלכלי בהקמת מפעל מקומי.

בכל מקרה יהיה צורך במכרז בין יזמים וקביעת היקף הסובסידיה באופן שסך התמיכות לא יעלה על רמת הכדאיות למשק ממעבר לבנייה מודולרית.

8.6.8 מודל תמריץ לבנייה מודולרית

8.6.8.1 האתגר או הבעיה

קיימת אי וודאות לגבי מכירת דירות שייבנו בבנייה מודולרית, ולכן המציאות היא שאין יזמים או קבלנים שמציעים דירות מבוססות טכנולוגיית בנייה זו. עד כה השוק מצביע ברגליים.

מסמך זה אינו עוסק בשאלת יוקר הבנייה ומטרתו אינה לעסוק בו אלא לבחון הכנסת טכנולוגיה נוספת לבנייה. יחד עם זאת, השאלה היא האם למדינה צריך להיות עניין להכנסת טכנולוגית בנייה נוספת, עשויה לגעת בשאלת היסוד של אספקת בנייה מודולרית.

בחלקו הקודם של הפרק נבחנות שאלות אלה וההנחה היא כי בנייה מהירה יותר, ונזקקת לפחות כוח אדם בתהליך הבנייה עצמו⁴⁸, יכולה לתרום בטווח הבינוני ואילך להפחתה בעלויות הבנייה, במתן מענה מהיר לשינויים בביקוש, וממילא להורדת מחירי הבנייה.

בכפוף להנחה זו, המודל הנוכחי בוחן תמריצים שונים לקידום טכנולוגית הבנייה המודולרית בישראל.

העובדה היא שאין בארץ בנייה מודולרית של דירות בבנייה רוויה וגבוהה. יש בנייה מוגבלת של בתים בודדים, בתי ספר וגני ילדים, שנבנים בטכנולוגיות של בנייה מודולרית מבנייה קלה עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, וכן בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מבטון לצרכים צבאיים וצרכי כליאה. מאידך ניתן לראות התפתחות בתחום הבנייה המודולרית במדינות שונות, והשאלה היא: האם רק חסמים פסיכולוגיים בשוק הישראלי מונעים התפתחות טכנולוגית בנייה זו או שיש גם נטל כלכלי עודף?

שאלה נוספת: האם ברמה המשקית, בנייה כזו היא כדאית למשק הישראלי?

העובדה שטכנולוגיה מסוימת אינה נמכרת בשוק מעידה על אחת משלוש:

א. השוק הגיע למסקנה שהיא נחותה מבחינה כלכלית, קרי, או שאינה משתלמת או שהסיכון גבוה מדי.

ב. כשל שוק מסוג I – תפיסת הסיכון מעוותת ונותנת ליזמים/קבלנים תחושה שהיא אינה מפוצה על ידי תועלות נגדיות, אף על פי שבפועל מדובר בטכנולוגיה כדאית. במקרה כזה צריך לפתור בעיית העברת מידע לשוק. הכשל הוא בסיגנלים.

ג. כשל שוק מסוג II – ייתכן ומבחינה מאקרו-כלכלית הטכנולוגיה בעלת יתרונות, אך מבחינת הגורמים המשתתפים בתהליך היא מהווה חלופה נחותה מבחינת תועלת הפרט. כלומר, אם

⁴⁸ כוח האדם הנחסך הוא כוח האדם הנמצא במחסור בישראל וכולל מקצועות כגון טפסנים, ברזלנים, רצפים וכיוב'. את אלה מרבים לייבא מיו"ש, סין, פורטוגל ורומניה. מעבר לבנייה מודולרית יקטין את הצורך ביבוא עובדים בעלי מקצועות אלה, כאשר כמות העובדים הכוללת תפחת ועיקרם יהיו עובדי מנוף וחיבורים אחרונים.

מחלקים את המשק לפרטים הבודדים מול התועלת הכוללת, הרי קיימת תועלת כוללת שאינה עוברת לפרטים המשתתפים בתהליך (התועלת מתנקזת למקומות אחרים). במקרה כזה צריך לבחון העברת ערך מהממשלה, המזהה את הערך העודף, לכיוון הזמים המשתתפים בתהליך, כאשר את חלקו הם יעבירו לרוכשים באמצעות מנגנון השוק, על מנת למשוך אותם.

8.6.8.2 המקרה הדטרמיניסטי

לצורך הדיון אין חשיבות אם נבנה את המודל סביב מ"ר בנוי או יחידות דיור סטנדרטיות.

יהיו:

V_i – עלות בניית יחידת הדיור ה- i בבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות

W_i – עלות בניית יחידת דיור ה- i בבנייה קונבנציונלית

$(V_i - W_i)$ היא העלות העודפת של בנייה מודולרית (עשויה להיות שלילית)

Q_i – תועלות מאקרו- כלכליות מעבר למחיר הישיר של בנייה, ליחידת הדיור ה- i

N – מספר היחידות שמעוניינים לבנות

אין הכרח שהתנאי יתקיים בעבור יחידה בודדת שכן ייתכן שבבניין בן K קומות, חלק מהיחידות עשויות להיות זולות וחלק יקרות יותר בבנייה מסוג אחד לעומת הסוג האחר ולכן יש חשיבות רק לסכימה, כשלגבי כל דירה בודדת יכול להתקיים יחס פרטני שונה.

אם מתקיים:

$$\sum_{i=1}^N (W_i - V_i + Q_i) > 0 \quad (1)$$

למדינה כדאי שיבנו יחידות בטכנולוגיה הנדונה, בעוד שאם הערך הוא שלילי, הרי מנקודת מבט של המדינה זה אינו כדאי.

אבל, אם הערך במשוואה (1) חיובי, אבל במקביל מתקיים גם:

$$\sum_{i=1}^N W_i < \sum_{i=1}^N V_i$$

הרי על המדינה להעביר לידי הקבלנים את הערך: $\sum_{i=1}^N (V_i - W_i)$

על מנת לנטרל את חיסרון עלות הטכנולוגיה החלופית.

כאמור זה בתנאים דטרמיניסטיים, ללא ציפיות למחיר שונה באחד מסוגי הבנייה ביחס לאחר, קרי, כאשר מעבר לעלויות הישירות אין בעיה של סיכון נתפס (perception) המביא לחששות מפני אי מכירה או מחירים נמוכים יותר של הדירות.

8.6.8.3 פרמיית הסיכון הנתפס

המודל דלעיל מבוסס על ערכים ידועים, הן של בנייה, הן של מכירה והן של מועדי המכירה, שכן בתוך העלויות הוכנסו, בלי לחשב במפורש בשלב זה של עיצוב המודל, גורם הזמן וערך עלות הזמן.

אולם על מנת להתמודד טוב יותר עם המציאות העומדת בפני הקבלנים והיזמים, יש לשקלל את מחיר אי הוודאות הקיימת בכמה רבדים:

א. מחיר מכירה בפועל של בתים מבנייה כזו.

ב. זמן המכירה.

ההנחה היא שניתן לשקלל לתוך מחיר המכירה את גורם הזמן, שכן יש אפשרות להמיר מהירות מכירה בעלות. ככל שפרמיית הסיכון הנתפס תהיה גבוהה יותר, כך המחיר למכירה מהירה יהיה נמוך יותר.

כלומר, בנוסף לעלות הבנייה, יש לשקלל אפשרות של הנחת מחיר בשל אי קבלת השוק את הטכנולוגיה, או לחלופין תקציב פרסום ל"חינוך השוק". בכל מקרה מדובר בסכום כספי שאמור לכסות את הסיכון הנתפס אצל הקבלנים-יזמים.

8.6.8.4 דילמה

ייתכן פער גדול בין תפיסת הסיכון על ידי הקבלנים-יזמים לבין המצב בפועל או התפיסה של הלקוחות בשוק. במקרה כזה הקבלנים ירצו לדרוש פיצוי גבוה מהנדרש.

הפתרון, המוצע שלהלן, מנסה "לאחוז את השור בקרניו" ולייצר מבנה תמריצים שיאפשר למדינה לתמרץ את הפעילות, במקרה והמדינה הגיעה למסקנה שיש יתרונות מאקרו-כלכליים, ויחד עם זאת לשלוט בהתנהגות הקבלנים, כך שלא יציעו את הדירות במחיר נמוך מדי שאינו ריאלי רק על מנת לקבל את הפיצוי במהירות ולמעשה להעביר למדינה נטל גדול מהמתוכנן בתמרוץ הבנייה המודולרית.

8.6.8.5 מודל A רשת הביטחון עם תמריץ התנהגותי

להבדיל מרשת הביטחון הנאיבית הנותנת ליזם הפועל בשירות המדינה, למשל בהסכמי BOT שונים, רשת ביטחון המבטיחה הכנסות מעל רמה מסוימת הנתפסת כרמת מינימום, המודל המוצע כאן כולל תמריץ התנהגותי. תמריץ זה מבוסס על הבטחת מינימום של תמורה למכירות בפועל, ויחד עם זאת, מגלם בתוכו תמריץ שלא לנסות ולהיפטר מהדירות במחיר נמוך מדי שיעמיס על המדינה נטל גדול מכפי שהיא מתכוונת.

על מנת לבנות את מודל רשת הביטחון, נדרש להבין כי אין מדובר ביחידות הומוגניות בעלות מחיר אחיד, ולכן נדרשת חלוקה לקטגוריות משנה המאפשרות מחירים שונים לרמות איכות/גודל, מיקום גיאוגרפי או גובה קומה שונה.

התמריץ ההתנהגותי מעבר לרשת הביטחון מטפל למעשה לא רק במניעת מכירת דירות מתחת למחיר שבו עלול להיווצר הפסד, אלא מייצר עידוד למכירת הדירות במחיר המשקף סטנדרט בנייה גבוה יותר.

לאורך זמן אין חשש לעליית מחירי הדירות שכן לתמריץ הזה יש ערך לגבי המדיניות העתידית: אם השוק יקבל סיגנל שדירות בטכנולוגיה הנדונה משקפות איכות גבוהה יותר, ולכן מחירן עשוי להיות גבוה יותר בזכות רמות גימור משופרות, חיסכון באנרגיה ואבזרים איכותיים, הרי הנכונות בעתיד לקנות דירות כאלה יכולה לייתר, החל מהשנה השלישית או הרביעית לתחילת שיווק דירות כאלה, את התמריץ וניתן יהיה להשאיר את המשך הנושא לכוחות השוק.

לכל אלה יש חשיבות ארוכת טווח, שכן על פי אינדיקציות ראשוניות, לבנייה כזו יש יתרונות ברמה המשקית, ולאחר שהעבודה תסתיים, ניתן יהיה להציג את הערך המאקרו-כלכלי מחושב במונחי תוספת לתמ"ג כתוצאה ממעבר לבנייה מודולרית.

8.6.8.6 הערה לעניין מחירי הדירות

בעידן של ניסיון להפחית במחירי דירות, עלול להשתמע מהאמור בפסקה לעיל כי יש ניסיון לייקר את מחירי הדירות. ננסה להבין את הקשר המתקיים בהקשר הזה בין ארבעה סוגי מחירים:

1. עלות ריאלית של דירה כולל רווח סביר
2. מחיר שוק
3. מחיר נתפס כהוגן
4. מחיר דירה שקולה בבנייה קונבנציונלית

הסכנה הגדולה לפרויקט היא **שמחיר השוק** יהיה נמוך מהמחיר שהוא **העלות הריאלית של הדירה** הכוללת רווח סביר.

במצב כזה קבלנים לא ירצו להיכנס לפרויקט אלא אם יקבלו פיצוי הולם. מטרת המדיניות היא לייצר לאורך זמן תפיסת ערך נכונה.

המחיר הנתפס כהוגן אמור להגיע לאחר מאמץ שיווקי מתואם של המדינה והקבלנים **לעלות הריאלית של הדירה הכוללת רווח סביר**.

מחיר הדירה השקולה בבנייה קונבנציונלית משמש כסוג של בנצ'מרק למחיר הדירה בבנייה המודולרית, כאשר בתחילה היחס ביניהם הוא העדפה לדירה בבנייה הקונבנציונלית ולאחר מאמץ שיווקי הוא משתנה באופן שהדירה בבנייה המודולרית נתפסת כבעלת ערך שאינו פחות מהדירה בבנייה הקונבנציונלית.

המאמץ הזה אמור לכלול יצירת מוטיבציה אצל הקבלנים להעלות ערך.

מאחר והמנגנון בנוי לפצות את הקבלנים בערכי הביניים, הרי על מנת לעבור את ערך הסף לטובת המחיר הנתפס כהוגן לאורך זמן, יש צורך בתמריץ להעלות מחיר.

מבחינת המדינה, הצלחת הקבלנים להעלות את **המחיר הנתפס כהוגן**, היא זו שתביא לאורך זמן לאימוץ סוג בנייה כזה ולחיסכון משקי.

מדובר בסוג של השקעה שיווקית על מנת לשנות תפיסות מושרשות ולייצר מוטיבציה לקבלנים לעשות את המעבר.

המנגנון הכלכלי אמור לפעול כדלהלן:

החדרת הקונספט של דירות בבנייה מודולרית עם מתן תמיכה פיננסית. מרגע שהקונספט ייתפס בשוק, ההנחה היא כי לדירות בטכנולוגיה זו יש יתרון כלכלי, הן בעלות הביצוע והן במהירות ההקמה, דבר שעשוי לקצר את זמן התגובה בין כל שינוי בביקוש לעומת ההיצע ובכך לתרום להפחתת לחצי מחיר. היתרון הכלכלי עשוי להוריד את המחירים, שכן היתרון הזה זמין לכל המשתתפים והיכולת לנצח בתחרות השיווקית תגרום לתחרות לאמץ את הטכנולוגיות, ובסופו של דבר, בשל גידול ההיצע (הזזת עקומת ההיצע ימינה), תגרום להורדת המחיר.

8.6.8.7 תת מודל A: תמרוץ ורשת ביטחון פרטניים

בתת מודל זה יש אבחנה בין מחירי דירות שונים. רשת הביטחון ניתנת לכל דירה או קבוצת דירות באותה קטגוריית מחיר בנפרד, וכן קיים תמרוץ למכירת דירות במחיר גבוה, שכן היזם מרוויח מהצלחה למכור במחיר גבוה יותר.

לשם המחשת המודל בעבור בניין מסוים, נציג מבנה בו יש כ-20-15 קומות ואשר מחירי הדירות ניתנים לקיבוץ בקטגוריות של 1-3, 4-7, 8-12, 13-20 על פי המחירים הנורמטיביים הבאים:

1,400,000 ₪ לקומות 1-3, 1,500,000 ₪ קומות 4-7, 1,600,000 ₪ קומות 8-12 ו-1,700,000 ₪ קומות 13+

הנחת העבודה כי המוכר יכול למכור דירה של 1,400,000 ₪ במחיר סף מינימלי של 1,000,000 ₪. הניתוח המספרי בדוגמא, המוצגת בטבלה 8.6.19, נעשה בעבור קבוצת הדירות שהוערכו במחיר 1,400,000 ₪.

8.6.8.8 התוצאה

אם הבעלים ינסה למכור במחיר של פחות מ-1,000,000 ₪ המהווים כ-72% מהמחיר, הוא עלול להפסיד לא מעט כסף, בשל פער גדול מדי שעלול לשקף גם סוג של רשלנות שיווקית.

העלות המרבית למדינה לכל דירה נמכרת תהיה במקרה הקיצון הזה 320,000 ₪. זה תרחיש קיצוני בו היזם והמדינה מפסידים והקונים מקבלים דירה בהנחה גדולה.

הנחת העבודה היא כי גם במקרה של סנטימנט שלילי כלפי דירות בבנייה מודולרית, הפער לא אמור לעלות על כ-25% במחיר, שכן המכירה תלווה בהסברה הכוללת את היתרונות של הבנייה המודולרית, מבחינת גימור, הפרדה אקוסטית, וכד'. כך שמכירה מתחת למחיר מסוים עשויה לעורר חשד לניצול לרעה בעסקה בין מקורבים או סידור הדדי בין קבלנים, או כל עסקה אחרת שיכולה להיווצר בעת שקיימים תמריצים כאלה.

טבלה 8.6.19: ניתוח לדוגמא של תת מודל IA

מחיר מכירה של דירה בקומות 1-3	רשת ביטחון	רווח/הפסד לקבלן ₪	עלות למדינה
א	1,000,000 ₪ או פחות דוגמאות	320,000 ₪ (סכום קבוע ⁴⁹)	
	1,000,000	320,000 ₪	320,000
	900,000	320,000 ₪	320,000
ב	מעל 1,000,000 ועד 1,400,000 דוגמאות	80% מהסכום החסר ל- 1,400,000	
	1,100,000	$300,000 \times 0.8 = 240,000$	240,000
	1,250,000	$150,000 \times 0.8 = 120,000$	120,000
ג	מעל 1,400,000 ועד 1,700,000 דוגמאות	20% מהסכום שמעל 1,400,000	
	1,500,000	$20,000 = 100,000 \times 0.2$	20,000
	1,700,000	$60,000 = 300,000 \times 0.2$	60,000
ד	מעל 1,700,000 דוגמא	תוספת קבועה של 60,000 ₪	
	1,800,000	60,000	60,000

⁴⁹ למעשה מכירה במחיר מתחת לערך סף, מהווה רשלנות או מהווה סוג של הונאה, ולכן מעבר לביקורת הרגילה הנדרשת בעת מתן פיצוי כזה, חובה לקבוע כי סכום הפיצוי מוגבל לגובה מסוים אשר מתחתיו תהיה השערת חזקה שהקבלן/יזם מצידו לא עשה את המוטל עליו.

אם ימכור ב- 1,000,000 ויותר יקבל כלהלן:

מכר ב- 1,200,000 ₪ יקבל 80% מהפער, קרי 160,000 ₪ המהווים 80% מה- 200,000 החסרים. כישלון במכירת הדירה לפי ערכה, יעלה למדינה במקרה הזה 160,000 ₪ וליזם 40,000 ₪ והקונה ירוויח הנחה של 200,000 ₪.

במחירי מכירה מעל 1,400,000 ₪ יישאר רק התמריץ של 20% מהסכום שמעל 1,400,000 ש"ח. כלומר אם מכר ב- 1,500,000 ש"ח, לעומת 1,400,000 ₪ מחיר נורמטיבי, יהיה לו רווח נוסף של 100,000 ₪, כפי שהיה קורה בכל מקרה בו קבלן מצליח למכור במחיר מעל מחיר השוק, ועוד תמריץ של 20% מ- 100,000 ₪, כלומר עוד 20,000 ₪ ובסך הכל רווח נוסף של 120,000 ₪, כאשר העלות למדינה במקרה זה היא 20,000 ₪ בלבד.

במחיר גבוה יחסית של 1,600,000 ₪, מחיר העולה על המחיר הנורמטיבי, הרווח שיווצר לו בפועל, יהיה: $200,000 + 200,000 \times 0.2 = 240,000$ ש"ח, כשחלקה של המדינה מתוך הרווח הזה הוא רק מרכיב התמריץ: 40,000 ₪, שבשלב של החדרת הטכנולוגיה לשוק מעודדת את הקבלנים ליצור ביקוש על ידי טכניקות שיווקיות גם אם המשמעות בשוליים היא מכירת חלק מהדירות במחיר גבוה יותר. (מוטיב הרווח אמור לנסות וליצור כוח נגדי לרתיעה הקיימת מאי הוודאות שבבנייה הזאת, וההסדר של מתן תמריץ יהיה מוגבל רק לשלב החדירה).

אלה תסריטים קצת רחוקים, אבל בכל מקרה יש הסתברות חיובית להתרחשותם ולכן יש צורך לקבוע גבול עליון לתמרוץ. לכן, כל מכירה מעל 1,700,000 ₪ בדוגמא שלפנינו, תזכה אותו רק ב- 60,000 ₪ תמריץ.

צריך גם לזכור כי מלבד התמריץ המתואר כאן, יש גם תמריץ של רווח קבלני נורמטיבי, כך שמדובר בתמריץ נוסף המתייחס רק לעידוד של טכנולוגית הבנייה, ובהינתן שהמדינה תאשר פרויקטים כאלה במסלול מואץ, לרבות אולי גם הקצאות קרקע בתנאים נוחים, הדבר עשוי לעורר עניין בקרב קבלנים. היתרון של מודל זה – שהיזם מנסה להפיק את המרב מכל דירה וכישלון בקבוצת דירות אינה בהכרח כישלון הפרויקט כולו.

החיסרון כולל שני מרכיבים: האחד המודל הזה מחייב עבודה בירוקרטית רבה לקביעת מחירי דירות פרטניים, עניין שעשוי לעורר הרבה מחלוקת ולהרתיע יזמים, מתוך ניסיון, בעימותים עם נציגי הממשלה בוויכוח על המחיר האמיתי של כל דירה.

8.6.8.9 תת מודל IIA – תמרוץ ורשת ביטחון ברמת בניין

רשת ביטחון לבניין שלם והתמריצים על בסיס כל הבניין.

להלן דוגמא:

בניין בן 20 קומות עם 4 דירות בקומה. רמת הביטחון (כלומר, המחיר הנורמטיבי הכולל) לבניין השלם עם 80 דירות היא 127.2 מיליון ₪⁵⁰.

רשת הביטחון תינתן רק לדירות שיימכרו, ולכן במקרה שחלק מהדירות לא תימכרנה, בגלל קושי להתגבר על העדר ביקושים, יורד מרשת הביטחון המחיר הנורמטיבי של דירות אלה, אם כי יש אפשרות שהמדינה תרכוש דירות אלה במחיר מוסכם, (הלוקח בחשבון את מיקומם או כל אילוץ אחר) ותעביר אותן למלאי הדיור הציבורי במקום חלק מהתקציב השנתי לרכישת דירות.

המודל הזה מבוסס על מחיר נורמטיבי גלובלי לבניין, וכולל בתוכו גם תמריץ למכירה מעל מחיר זה. כלומר, אם מחיר היעד במודל, מהווה מחיר נורמטיבי מלא לקבלן (עלות ועוד רווח קבלני הוגן), המדינה מתמרצת את הקבלן להשיג מכירה של כל הדירות במחיר גבוה יותר.

המטרה: להעלות את המיצוב של דירות בבנייה מודולרית בעיני הציבור לטובת פרויקטים עתידיים וליצור תמריץ אצל הקבלן למאמץ שיווקי גדול יותר (ראה דיון בהמשך).

גובה התמריץ יהיה 20% מהתוספת שמעל המחיר הנורמטיבי, ועד תוספת של 20% על מחיר הבניין. כלומר, ערכו המוחלט התמריץ יישאר קבוע אם התוספת תעלה על 20%, ושיעורו המקסימלי יהיה 4% מהמחיר הנורמטיבי. התמריץ יינתן כמובן מעבר למחיר המלא שהקבלן ישיג עבור הבניין, כאשר רשת הביטחון שומרת מלמטה למקרה של אי הצלחה ומכירה במחיר נמוך מהמחיר הנורמטיבי.

כלומר: רשת הביטחון שומרת מלמטה והתמריץ ממריץ מלמעלה.

המשמעות היא כי אם היזם מכר מעל המחיר הנורמטיבי המחושב של 127.2 מיליון ₪ התוצאות יהיו כמוצג בטבלה 8.6.20.

טבלה 8.6.20: ניתוח לדוגמא של מודל IIA כשהיזם מוכר מעל למחיר הנורמטיבי (באלפי ₪)

הרווח הכולל של הקבלן	חלקה של המדינה בתמריץ	תוספת לפדיון מעל המחיר הנורמטיבי	תוספת מחיר מכירה מעל המחיר הנורמטיבי
0	0	0	0%
15,264	2,544	12,720	10%
30,528	5,088	25,440	20%
43,248	5,088	38,160	30%

⁵⁰ על פי התפלגות מחירי הדירות לפי קומות שהוצעו בדוגמא הקודמת

התרחישים של 20% או 30% על בניין שלם אינם בעלי סבירות גבוהה להתרחש, אבל המטרה היא להמחיש כי הסכום שהמדינה נותנת לטובת החדרת הטכנולוגיה הוא מוגבל. עיקר הסיכון של המדינה מתקיים במקרה של מחיר מכירה נמוך מדי, כאשר מתחת למחיר מסוים, היזם לוקח את הסיכון עליו וחייב לעשות מאמץ לפחות לעבור ערך סף, שבדוגמא כאן נקבע להיות 80% ברמת הבניין כולו. כמובן שאפשר לקבוע ערכי סף שונים.

אם הקבלן ינסה למכור במחיר נמוך מדי, הרי מתחת לרמת מחירים מסוימת, רשת הביטחון לא תעבוד. כלומר הקבלן לא יכול להתרשל או לחלק את הדירות במחיר לא ריאלי. התחום של 80%-120% עשוי להיות בשליטתו, והמדינה מעוניינת לטווח הבינוני במחירי דירות: לא נמוכים מדי, בגלל תפיסת הערך של הלקוחות ובגלל הרצון להפוך את הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות לשוות-ערך לפחות, אם לא לעדיפה, על הבנייה הסטנדרטית, בגלל יתרונותיה המאקרו-כלכליים. בטווח הארוך, לאחר שהבנייה המודולרית תהפוך ללגיטימית מנקודת מבט צרכנית, יש סיכוי סביר שמחירי הדירות בבנייה כזו יוזלו, שכן, מהירות האספקה תגדל, ולכן תגובה מהירה יותר לביקושים מקטינה לחצים על המחיר, וכן גם ככל שבנייה זו יעילה יותר כלכלית, בענף בתחרות, למרכיב העלויות יש השפעה גם על המחיר הסופי.

אם המדינה תרצה להוריד את מחירי הדירות באופן כללי, הדבר יכול להיעשות על ידי היצע הקרקע לבנייה, האצת תהליך הרישוי (אפשרית גם היא במקרה של דירות בבנייה מודולרית, בשל הסתמכות על תקנים מחמירים בשלב התעשייתי של בניית היחידות) והפחתת מיסים, אבל בשלב הראשון, אסור לפעול בכיוון של הורדת מחירים דווקא על דירות אלו, שכן איתות הערך הנתפס חשוב בקליטת הדירות בבנייה המודולרית והטמעתן.

בטבלה 8.6.21 נתונה דוגמא לניתוח המודל במצב בו המכירה היא במחירים נמוכים לעומת המחיר הנורמטיבי.

במודל זה, השפעת מכירה במחירים נמוכים מדי היא כדלהלן: רק עד 20%- הקבלן יכול לצפות לשיפוי מלא⁵¹, ואילו מתחת ל 20%- הוא כבר משלם סוג של קנס.

יצוין כי גישה זו שמאופיינת בתת מודל II יכולה להיות מיושמת גם על פרויקט שלם, של מספר בניינים, שיעבור הליך שמאות כולל. כלומר, ההבדל העקרוני בין שתי הגישות של מבנה התמריצים והפיצוי (האם יש להתחשב עם הקבלן על כל דירה פרטנית, או על מחיר כולל לפרויקט בו ייתכנו קיזוזים בין דירות שנמכרו במחיר גבוה מהמחיר הצפוי לבין דירות במחיר נמוך יותר) ברור שהתוצאה הכספית עשויה לצאת פעם לטובת מודל אחד ובמקרה אחר לטובת המודל השני.

מבחינת הביורוקרטיה, וההתנהלות המדינה מול הקבלנים, יש ככל הנראה יתרון למודל II.

⁵¹ כמובן אפשר להחיל גם על תת מודל זה את העיקרון שנמצא בתת המודל הקודם לפיו, בכל מקרה לא יהיה שיפוי מלא אלא שיפוי של למשל 90% או 80% מההפסד בפועל.

טבלה 8.6.21: ניתוח לדוגמא של מודל IIA כשהיזם מוכר תחת למחיר הנורמטיבי (באלפי ₪)

הפסד במחיר מכירה לעומת המחיר הנורמטיבי	הפסד/רווח לבניין לעומת המחיר הנורמטיבי	פיצוי רשת ביטחון	הפסד/רווח לקבלן לאחר פיצוי
-40%	-50,880	25,440	-25,440
-30%	-38,160	25,440	-12,720
-20%	-25,440	25,440	0
-10%	-12,720	12,720	0

8.6.8.10 הערה לסיכום סוגיית המאמץ השיווקי ותמרוצו

קוראי הדו"ח עשויים לתמוה מדוע צריך לתמרץ מכירה במחיר מעל למחיר הנורמטיבי ולא להסתפק בפיצוי עד למחיר הנורמטיבי, כאשר המחיר הנורמטיבי ייקבע על ידי קבלנים.

התשובה נעוצה בהבנת התהליך השיווקי.

הקבלן אינו יודע מראש לאילו מחירים יגיע. אם יובטח לו בתחום שבין 1 מיליון ₪ ל-1.4 מיליון ₪ פיצוי מלא ותו לא, הרי הוא לא יעשה מאמץ למכור את הדירות במחירן המלא.

ככל שמאמציו לשווק את הפרויקט יהיו גדולים יותר, ולכן עשויים למשוך למחירים גבוהים יותר, כך יגדל הסיכוי שיגיע למחיר המטרה הנורמטיבי של הדירות. על מנת להגיע למחיר המירבי, אנו מעוניינים שיעשה מאמצים גדולים ככל שניתן. הוא ימקסם את מאמציו אם ידע שהוא עשוי לזכות בבונוס.

נניח שהקבלן עומד בפני 4 רמות מאמץ כאשר 1 משקפת את המאמץ הקטן ביותר ואילו 4 את המאמץ המירבי.

הקבלן לא יודע בוודאות איזו רמת מאמץ תביא אותו למחירי היעד והוא ינסה לנקוט את האסטרטגיה המיטבית שבה ערך התמריץ יעלה על העלות הכרוכה בהגדלת המאמץ.

כלומר, מאמץ ברמה 1 שתביא אותו למחיר של 1 מיליון ₪, תעלה למדינה 400 אלף ₪.

מאמץ ברמה 2 שתביא אותו למחיר של 1.2 מיליון ₪, תעלה למדינה 240 אלף ₪ והקבלן ירוויח 40,000 ₪ נוספים. כלומר התמריץ יסייע למדינה להוזיל את העלות הכוללת שהיא משקיעה.

וכך מאמץ ברמה 3 שיביא אותו למחיר של 1.4 מיליון ₪ יגרום למדינה לשלם רק 80 אלף ₪.

נשאלת השאלה מדוע שהמדינה תשלם בונוס על מחיר של מעל מחיר המשקף מחיר שוק הוגן לדירה והתשובה פשוטה: הקבלן לא מכיר את הנוסחה המדויקת בין גודל המאמץ השיווקי לתוצאה. הוא רק יודע שיש קשר חיובי, כך שככל שהמאמץ השיווקי גדול יותר, כך התוצאה טובה יותר. המקום שבו הוא עוצר זה המקום שבו הוא מעריך כי התמריץ אינו שווה את תוספת המאמץ. כלומר זה תלוי בפונקציית השיווק שלו, דהיינו, מידת היעילות השיווקית של כל שקל הוצאה נוסף על שיווק.

אנו מניחים שהוא יבחר למקסם את התועלת שלו באותם תנאי אי וודאות כאשר התמריץ מסייע לו להעלות את רף המאמץ השיווקי ולהקטין בשורה התחתונה את הוצאות הממשלה.

8.6.8.11 מודל B

מודל זה מבוסס על מודל שכבר נוסה בתמרוץ מכירת רכבים היברידיים בעלי צריכת דלק מופחתת וממילא רמת זיהום מופחתת שהיא אינטרס מובהק של המדינה, מוצר בו יש השפעות חיוביות מובהקות, אך התמריץ הפרטני של כל אזרח אינו לרכוש רכבים היברידיים, מפני שהיוון הפרש עלויות הדלק למשך חיי רכב ממוצע בידי הרוכש, אינו מגיע לפער המחיר שבין רכבים היברידיים ובין רכבים רגילים. לכך ניתן להוסיף גם את החשש מטכנולוגיה לא מוכרת שייתכן ועלולה לייקר את הוצאות האחזקה. שילוב של פער המחיר והגדלת רמת האי וודאות הוביל לכך שלא נרכשו רכבים היברידיים בהיקף שעולה עם האינטרס הכללי. ניתן להראות כי הקטנת זיהום האוויר מרכב עשויה להוריד מחלות נשימתיות ולהקטין הוצאה ציבורית בתחום הבריאות, כמו גם הקטנת צריכת הדלק שמעבר להשפעות שריפת דלקים פוסיליים, עצם הקטנת הצריכה, השינוע, המכירה וכו' הינה בעלת אפקט נוסף של חיסכון.

המדינה נקטה, אפוא, בגישה של הפחתת מיסים, כאשר מס קנייה המהווה גורם מרכזי בעלות הרכב הופחת מ-83% ל-30%, ועל ידי כך מחירי מכוניות היברידיות הגיעו למחירים הדומים למחירי מכוניות רגילות.

כאן כבר הצרכן עמד בפני מצב בו היוון החיסכון בדלק עלה על רמת האי וודאות של תחזוקת הרכב, ולכן חזינו בתוצאה שהייתה שיא עולמי⁵². בשנת 2018 נרכשו בישראל מתוך כלל המכוניות 17.3% מכוניות היברידיות לעומת 3.9% באירופה, 3.5% בסין ו-2.6% בארה"ב.

לאחר הצלחה כזו, וחדירה מסיבית של מכוניות היברידיות לשוק, המדינה העלתה מחדש באפריל 2019 את המיסים⁵³, שכן מרכיב המיסוי לרכב מהווה סעיף חשוב בהכנסות בתקציב המדינה, אך כעת לאחר שכלי הרכב היברידיים כבר הפכו להיות דבר נפוץ, כוחות השוק פעלו. יבואני כלי הרכב מיהרו לספוג חלק מהעלויות כאשר את חלקם הצליחו אף לגלגל על היצרנים שמצידם יכולים להוריד מחירים ככל שהתעשייה מתקדמת ומייצרת יותר מכוניות מדגמים אלה. הצרכנים פחות חוששים וכעת יכולים

⁵² <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001283316>

⁵³ <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001265484>

להעריך את פער המחיר מול החיסכון הממשי בדלק, ולכן, אין חשש לנסיגה במכירות כלי הרכב ההיברידיים בארץ.

יישום המודל בבנייה מבוסס על מספר עקרונות:

שיעור המס על הדירות גבוה מאוד, ומעבר לכך חלק מהמס בעצם מבוסס על העובדה שהקרקע במקרים רבים היא ברשות המדינה ולכן למדינה יש שליטה על מרכיב גבוה מאוד של העלות: קרקע + מס, המהווים ביחד מעל מ-60% מהעלויות.

הדירות בבנייה המודולרית, במרבית הפרמטרים אמורות להיות יותר חסכוניות מאשר דירות רגילות, ככל שהדבר נוגע לתיקונים שלאחר הבנייה, ותקלות שונות.

כלומר, המודל מבוסס על הרעיון שאם נוריד את מחיר הדירה בעזרת הגורמים בהם שולטת הממשלה, נניח ב- 5%-10% (למשל על ידי הורדת המע"מ), הרי הורדת מחיר זו עשויה לעורר רכישת דירות כאלו (הקבלנים ייקחו לעצמם חלק מההורדה, אבל במידה והמדינה תשווק קרקעות למספר קבלנים באותם אזורים ביקוש, התחרות עשויה להניב הורדה של מחירי הדירות גם לצרכנים הסופיים).

שיווק דירות כאלו למשך תקופה בה ייווכחו רוכשי הדירות כי אין מדובר ברכישת "חתול בשק", אלא בדירה איכותית, תאפשר לממשלה להחזיר את רמת המיסוי/מחירי הקרקע לרמתן הרגילה.

יתרונות המודל:

רמת ההתחשבנות הביורוקרטית הינה נמוכה במידה ניכרת לעומת החלופות הקודמות, שכן חישוב מחיר נורמטיבי של דירות, או אפילו קומפלקס דירות, במחיר משוקלל עשוי לגרום לחילוקי דעות עזים. לעומת זאת – הורדת מע"מ מ-17% ל-7% לתקופה נתונה, הינו מהלך פשוט יחסית.

האפשרות לקבל דירות במחיר קרקע מופחת, (לרבות מחיר אפס) גם הוא יכול להיות חלופה סבירה כפי שלמעשה הממשלה הפעילה בעבר ובפועל גם במחיר למשתכן.

חסרונות המודל:

ככל שהדבר נוגע למע"מ בשיעור שונה מהשיעור הרגיל, כבר נכתבו עבודות רבות על המודל הישראלי שהוא אחיד (למעט ירקות ופירות טריים ואילת) ובכך יתרונו הגדול. כל סטייה נוספת ממודל המע"מ האחיד מייצר נטל ביורוקרטי ומגדיל את אי הוודאות של תשלומי המיסים ואת מורכבות החישובים ההדדיים.

חיסרון אחר, בהשוואה למודל הקודם: הרי הפחתת מע"מ או הפחתה במחיר הקרקע עשויה לא להספיק מנקודת מבט הקבלנים/היזמים שכן הם עלולים להעריך כי בנייה כזו, לפחות כל עוד לא הפכה להיות סטנדרט בשוק, לא תניב מכירות, והעדר שיפוי = רשת ביטחון למקרים כאלה, תגרום לכך שרבים לא ירצו להיכנס להימור על פרויקטים כאלה.

אין להשוות את גובה ההתחייבויות שקבלנים/זממים לוקחים לשוק כלי הרכב, שבו גם היו כבר התנסויות קודמות (בעיקר דגמי טויוטה) וגם לא ניתן להשוות את ההוצאה היחסית על רכב מול הוצאה על דירה, כך שהחשש מהסיכון להיתקע עם דירה לא מתאימה, עלול לטרפד מיזם כזה.

לכן, אם יש רצון שהכנסת הטכנולוגיה תצליח, חשוב לתת רמת ביטחון גבוהה יותר לקבלנים/זממים לכל מקרה בו יהיה כישלון שיווקי והמחירים יהיו נמוכים מדי.

8.6.8.12 השוואת עלויות לתקציב המדינה בין מודל All לבין מודל B

הנחות עבודה:

אם תתקבל החלטה לתמרץ בנייה מודולרית, היא לא תתחיל לפני 2021.

בנייה בפועל לא תתחיל לפני שיושלמו תהליכי תכנון, כך שרק ב-2022 לכל המוקדם יתחילו לבנות בטכנולוגיה זו.

התמריץ אמור להינתן בשלב של שיווק או לקראת סיומו לגבי מודל All ואילו במקרה של הורדת מע"מ, גם כאן מדובר בשלב המכירה עצמה, לכן יש לדבר על 2024⁵⁴ ובהנחה שהתמריץ יינתן ל-3 שנים שזה הזמן בו תידרש הטמעה של טכנולוגיה חדשה כזו וקבלתה מבחינה ציבורית, ההתייחסות לעלויות התקציביות נוגעות לשנים אלה 2024, 2025, 2026.

ההשוואה מטרתה רק להמחיש את ההבדלים האפשריים בין השיטות ולבצע ניתוח רגישות בעבור כמה ערכים אפשריים⁵⁵.

כיום חסרות למעלה מ-100 אלף דירות במדינת ישראל (התאחדות בוני הארץ 2018), ובכל שנה מתווספים 53 אלף משקי בית חדשים למשק. מספר זה צפוי לגדול לאורך זמן, לכן נזדקק לתוספת של 3 מיליון דירות עד לשנת 2025. לעומת זאת מספר התחלות הבנייה בישראל עומד על 45 אלף דירות בשנה בלבד. תחזית הריבוי הטבעי של אזרחי המדינה מצביעה על כך שבשנת 2025 יחיו בישראל כ-16-18 מיליון תושבים. לטובת כך יהיה צורך לבנות עוד כ-3 מיליון דירות, המהווים הכפלת מספר הדירות הקיימות היום בישראל.

תחזית סבירה למספר הדירות שיבנו בישראל בשנים הללו ותחילת חדירת הטכנולוגיה החדשה של בנייה מודולרית תלת ממדית, בהנחה שתהליך ההחלטה ייסגר במהלך 2020 ואחריו יתחיל תהליך תכנון נתונה בטבלה 8.6.22⁵⁶. ככל שההנחות לגבי מועד ההתחלה יזוזו, ניתן להזיז את מועדי היישום קדימה ללא שינוי משמעותי לפחות בטווח של שנתיים-שלוש.

⁵⁴ אם לא יחול שינוי דרמטי נוסף בזמן הבנייה, מעבר לחיסכון אותו אנו חוזים בעבודה זו.

⁵⁵ מובן שניתן לבצע את אותו חישוב לכל סדרת נתונים אחרת

⁵⁶ סביר להניח כי המספרים יהיו גדולים יותר ויפעילו לחץ גדול יותר הן על מחירים והן על הצורך ביבוא עובדים זרים

טבלה 8.6.22: תחזית למספר הדירות שיבנו בישראל בשנים 2024 – 2026

שנה	2024	2025	2026
מספר דירות משווקות	55,000	58,000	60,000
אחוז בבנייה מודולרית	1%	2%	3%
כמות דירות בבנייה מודולרית	550	1,160	1,800

בטבלה 8.6.23 ניתן לראות את העלות למדינה ב"כובע" של רשת ביטחון במקרה בו היזם מוכר את הדירות במחירים הנמוכים מהמחיר הנורמטיבי, וב"כובע" של תמריץ במקרה בו היזם מצליח למכור את הדירות במחיר הגבוה ממחיר זה.

טבלה 8.6.23: ניתוח לדוגמא של עלות למדינה במודל IIA

מודל רשת הביטחון הניתנת ע"י המדינה (אלפי ₪)			הפסד במחיר מכירה
שנה			
2026	2025	2024	
429,300	276,660	131,175	-15%
286,200	184,440	87,450	-10%
286,200	184,440	87,450	-5%
0	0	0	0%
28,620	18,444	8,745	5%

כך לדוגמא, ניתן לראות שבמקרה בו היזמים ימכרו את הדירות במחיר הנמוך ב-10% מהמחיר הנורמטיבי (1,270 א' ₪ בדוגמתנו), המדינה תעניק להם רשת ביטחון בגובה 87.5 מיליון ₪ ב-2024, 184.5 מיליון ₪ ב-2025, ו-286.2 מיליון ₪ ב-2026. בסך הכל, מצב העניינים הזה יעלה למדינה סדר גודל של 558 מיליון ₪.

מאידך, מקרה בו היזמים יצליחו למכור את הדירות במחיר הגבוה ב-5% מהמחיר הנורמטיבי, המדינה תתמרץ את היזמים בתמורה בסדר גודל של 8.7 מיליון ₪ בשנת 2024, 18.4 מיליון ₪ בשנת 2025, ו-28.6 מיליון ₪ בשנת 2026. בסך הכל 55 מיליון ₪.

לעומת זאת, במודל B יתקיים המצב המוצג בטבלה 8.6.24 מבחינת העלות למדינה במונחי הפסד מע"מ.

כאשר המדינה מורידה את המע"מ ב-10% לגובה של 7% בלבד, היא הולכת לאבד 74.4 מיליוני ₪ ב-2024, 157.6 מיליוני ₪ ב-2025 ו-244.6 מיליוני ₪ ב-2026. בסך הכל, אם המדינה תוריד את אחוז המע"מ ל-7% בלבד, המדינה תאבד 477 מיליוני ₪. במקרה בו המדינה תוריד את אחוז המע"מ ל-3%, היא תאבד 667.8 מיליוני ₪. במקרה זה יהיה כדאי לה יותר לנקוט במודל All בו הקבלן לא ימכור בפחות מ-10% מהמחיר.

התוצאה לאחר שלוש שנות עידוד תהיה בעיקר שסוג הבנייה הזה יהפוך להיות מקובל והוא בהחלט יכול לגדול הרבה מעבר ל-20% מכלל הדירות החדשות, דבר שיקטין את הלחץ על שוק עבודת פועלי הבניין שהוא שוק במחסור תמידי וממילא עשוי בסופו של תהליך גם להביא להקטנת מחירי הדירות מצד העלות.

טבלה 8.6.24: ניתוח לדוגמא של העלות למדינה במודל B

העלות למדינה במונחי הפסד מע"מ			
שנה			
מע"מ	2024	2025	2026
0%	127,064	267,990	415,846
3%	104,641	220,697	342,462
7%	74,744	157,641	244,615
12%	37,372	78,821	122,308
17%	0	0	0

יש לקחת בחשבון כי לאחר כשנתיים של תמריצים אחוז הקבלנים שירצו לבנות בבנייה מודולרית יהיה גבוה מ-3%. במקרה כזה המדינה צריכה להחליט האם ברצונה לאפשר לכל מי שמעוניין להיכנס לטכנולוגיה ולקבל את התמריץ או לפעול על בסיס כל הקודם זוכה או על בסיס קריטריון אחר.

8.6.8.13 מודל C ליסינג ומכירה בסוף התקופה

תחום הבנייה המודולרית הוא תחום שנמצא בחיתוליו בישראל. על-אף שמחקרים ומקרי בוחן בעולם הוכיחו כי ככלל מדובר בשיטת בנייה איכותית יותר, הצרכן הישראלי עלול לנהוג בחשדנות יתירה כלפי דירות אלו ולהירתע מקנייתן. אנו צופים כי הקונים הישראלים יכולים להירתע מקניה של דירות במבנים בבנייה מודולרית משתי הסיבות הבאות:

- **אפשרויות עיצוב והתאמה אישית מוגבלות** – היחידות המודולריות מתוכננות ומעוצבות מראש. עקב אופי הייצור שלהן, אפשרויות השינויים העתידיים בעיצוב המבנה מוגבלים⁵⁷. כך לדוגמא, שינויים בתוך הדירה (שיפוצים, הוספת או הורדת קירות וחלונות) יהיו מאוד בעייתיים.
 - **אי ודאות** – קיימת אי הודאות בנוגע לבנייה מודולרית, בשל היותה צורת בנייה חדשה ולא מוכרת בשוק הישראלי, הקונים יכולים להפריז בהערכתם את חסרונות הדירות ואולי את שרידותן על פני זמן ולכן לחשוש מירידת ערך מהותית כעבור מספר שנים.
- נוכח החשש שהובע שצרכנים הישראליים יימנעו מקניית דירות שנבנו בטכנולוגיה זו, הוצע מודל חלופי למודלים של הורדת המחיר - מודל הליסינג, לפיו הקונים יחכרו את הדירות מהקבלנים למשך תקופת זמן מסוימת, שבתומה יוכלו להחליט האם לרכוש את הדירות. המדינה תעניק רשת בטחון לקבלנים שתאפשר להם, במידה ודיירים רבים לא ירצו להשלים את תהליך הקנייה והשוק לא יציע מחיר סביר שישקף את ערך הנכסים, פיצוי או בהשלמת מחיר או ברכישת הדירות והעברתן לשימושיה (דיוור ציבורי לאחר שיפוץ או מכירה לזכאים שונים בתנאים מיוחדים).

הנחות המודל:

- המודל מנטרל את עליית המדד ומניח כי תשלומי החכירה והתשלום הסופי יהיו צמודים למדד.
- המודל מניח כי עליית הערך הריאלי של דירות דומות יהיו כ- 30% במהלך 20 שנה כלומר 1.32% עלייה ממוצעת לשנה.
- המודל אינו רגיש להנחה זו ומטרת ההנחה היא רק להראות את המצב היחסי של רוכשי הדירות.
- 10% מעלות הדירה ישולמו על-ידי הקונים כדמי כניסה – תשלום ראשוני.
- 50% מעלות הדירה ישולמו על-ידי הקונים לאורך השנים, כדמי חכירה חודשיים.
- 40% מעלות הדירה ישולמו על-ידי הקונים בתום התקופה כנגד העברת הבעלות על הדירה לרשותם.
- נבחנו תקופות שונות לפריסת התשלומים, ונראה כי התקופה של 20 שנים בשיעורי ריבית הולמים, תהיה התואמת ביותר לדמי שכירות בשוק ערי השדה סביב לתל אביב.
- הריבית השנתית תהיה אפקטיבית 4.9% (ריבית חודשית 0.4%)
- על בסיס ההנחות הקודמות, תהליך חדירת הדירות לשוק יהיה על פי הקצב:

שנה	2023	2024	2025	סה"כ
כמות דירות נמכרות	550	1,160	1,800	3,510

להלן מספר תרחישים אפשריים שנלקחו בחשבון:

⁵⁷ <https://blog.capterra.com/the-pros-cons-and-cost-of-modular-homes>

תרחיש א – הדירות לא ראויות למגורי אדם

מדובר בתרחיש קיצוני שסבירותו נמוכה, לפיו בתום התקופה הדירות נמצאות במצב שלא ראוי למחיה. בתרחיש זה מוצע כי המדינה תחזיר לשוכרים בתום התקופה את 10% ששילמו בתחילת התקופה (צמוד למדד), ותשלם 40% נוספים לקבלנים במקום הקונים המיועדים, על-מנת להשלים את עסקת קניית הדירות. המדינה בעצם קונה את הדירות מהקבלנים. אמנם להערכתנו מדובר בתרחיש קיצוני, נתנו לו משקל של 10% סבירות.

1,800,000	1,700,000	1,600,000	1,500,000	1,400,000	מחיר דירה מקורי
900,000	850,000	800,000	750,000	700,000	תשלום המדינה פר דירה בתום התקופה 50%

תרחיש ב' – הדירה נשחקה יותר מדירה קונבנציונלית בתום התקופה

בתרחיש זה, הדירות בבנייה המודולרית נמצאות בממוצע במצב בלוי במעט בהשוואה לדירות בבנייה הקונבנציונליות. המשקל שקבענו לתרחיש זה הוא 20% סבירות. במצב זה, המדינה תעניק בתום התקופה לשוכרים סכום של 200,000 ₪ לשיפוץ הדירות. השוכרים יוכלו להחליט האם ישתמשו בכסף לשיפוצים או לאו, ויקבלו אותו בכל מקרה. מדובר בסכום כסף משמעותי, שיכול לסייע לקונים בקניית הדירה במידה והם לא מעוניינים לשפצה.

תרחיש ג' – שחיקה קונבנציונלית או פחות

התרחיש הסביר ביותר בעינינו, על בסיס סקירת הספרות שנעשתה, היא כי בתום התקופה הדירות יהיו במצב שהוא לכל הפחות טוב כמו מצבן של דירות בבנייה הקונבנציונלית. הענקנו לתרחיש זה סבירות של 70%. במקרה זה, המדינה לא משלמת כלום לשוכרים, והם עשויים לקנות את הדירות⁵⁸.

חישוב המודל

על-מנת לחשב את העלות למדינה, הכפלנו את ההסתברות של כל תרחיש בעלות למדינה בכל תרחיש, חיברנו בין התוצאות והכפלנו אותן בכמות הדירות המודולריות לשנה. טבלה 8.6.25 המציגה את העלויות בהתאם למחיר דירה משתנה.

אפשרות יציאה באמצע

אנו צופים כי חלק מהשוכרים ירצו לצאת באמצע החוזה מסיבות שלא קשורות לטיב הדירות. יכול להיות לכך מגוון סיבות: רילוקיישן, החלפת מקום עבודה בתוך הארץ, נסיבות משפחתיות ועוד. לכן, עלינו

⁵⁸ או למכור את הזכות

לקחת בחשבון מצב בו כ- 20%⁵⁹ מהשוכרים יצאו מהחוזת באמצע התקופה. בסך הכל מדובר ב-702 דירות (20% מסך של 3,510 דירות). במצב זה, אנו מציעים כי בנוסף לעלויות שצינו מעלה בתרחישים השונים, ב- 20% מהמקרים בכלל התרחישים המדינה תשלים לקבלנים את דמי החכירה בתקופות בהן הדירות עומדות ריקות (בטרם מציאת שוכרים/קונים חדשים). מכירת דירה יד שנייה לוקחת בישראל בין 90 ל-315 ימים (כתלות במיקום גאוגרפי ומאפייני הדירה)⁶⁰. בגלל שמדובר בסוג בנייה לא מוכר בישראל, סביר להניח כי מכירת דירה מודולרית תיקח יותר זמן, סדר גודל של שנה וחצי. בנוסף, נניח בממוצע 2 מעברי דירה לאורך 20 שנים, כלומר, 20% מהדירות יעמדו ריקות 3 שנים בממוצע. תשלום דמי חכירה עבור 3 שנים שווה ערך ל-7.5% מעלות הדירה. דוגמא נתונה בטבלה 8.6.26.

לחישוב העלויות הכוללות למדינה, כמוצג בטבלה 8.6.27, הוספנו לעלויות הכוללות את כלל ההסתברויות של התרחישים השונים את התשלום של המדינה לקבלנים עבור דמי החכירה ל- 3 שנים בעבור 20% מהדירות שהחוזת שלהן הופר באמצע.

טבלה 8.6.25: ניתוח לדוגמא של העלות למדינה לפי מודל C כשדירות לא נמכרות או נפגמו עקב

ליקויי קיים גבוהים מאלה שבבנייה הקונבנציונלית

מחיר דירה	1,400,000	1,500,000	1,600,000	1,700,000	1,800,000
כמה על המדינה לשלם ב- 2043	60,500,000	63,250,000	66,000,000	68,750,000	71,500,000
כמה על המדינה לשלם ב- 2044	127,600,000	133,400,000	139,200,000	145,000,000	150,800,000
כמה על המדינה לשלם ב- 2045	198,000,000	207,000,000	216,000,000	225,000,000	234,000,000
סה"כ על המדינה לשלם בתום התקופה	386,100,000	403,650,000	421,200,000	438,750,000	456,300,000

⁵⁹ על-פי סקר יד2, למעלה ממחצית מהישראלים נוהגים לעבור דירה לפחות פעם בעשור, כשלמעשה כל ישראלי שישי עובר דירה בין שנתיים ל- 5 שנים וכל ישראלי חמישי עובר דירה בין 5 ל- 10 שנים. יתר הישראלים נוטים לעבור דירה בתדירות נמוכה מפעם מתוכם קרוב ל- 16% לא עברו דירה מעולם. באופן טבעי, צעירים נוטים לעבור דירה יותר בהשוואה למבוגרים. כך למשל, פלח האוכלוסייה שבין גיל 50-65 מדורג בסקר כפלח אוכלוסייה יציב מבחינת מגורים, שבו כ-65.7% לא עברו דירה ב-10 השנים האחרונות לפחות. על סמך נתונים אלה, החלטנו כי ההנחה ש- 20% מהשוכרים ירצו לצאת באמצע החוזת היא הנחה סבירה.

⁶⁰ פטרסבורג עופר, מוכרים דירה? לא כל כך מהר, ידיעות אחרונות, 2018.

טבלה 8.6.26: ניתוח לדוגמא של פיצוי ליזמים במקרה של דירה ריקה בתקופת ההחכרה

1,800,000	1,700,000	1,600,000	1,500,000	1,400,000	מחיר דירה
135,000	127,500	120,000	112,500	105,000	הפיצוי לקבלנים על 3 שנים בהן הדירה עומדת ריקה – תשלום פר דירה
94,770,000	89,505,000	84,240,000	78,975,000	73,710,000	הפיצוי לקבלנים על 3 שנים בהן הדירות עומדות ריקות – כלל הדירות

טבלה 8.6.27: ניתוח לדוגמא של עלויות כוללות למדינה לפי מודל C

1,800,000	1,700,000	1,600,000	1,500,000	1,400,000	מחיר דירה
103,090,000	98,585,000	94,080,000	89,575,000	85,070,000	כמה על המדינה לשלם ב- 2043
182,390,000	174,835,000	167,280,000	159,725,000	152,170,000	כמה על המדינה לשלם ב- 2044
265,590,000	254,835,000	244,080,000	233,325,000	222,570,000	כמה על המדינה לשלם ב- 2045
551,070,000	528,255,000	505,440,000	482,625,000	459,810,000	סה"כ על המדינה לשלם בתום התקופה

8.6.9 סיכום ומסקנות

בעבודה זו בחנו את הכדאיות של המעבר לטכנולוגית בנייה מודולרית אל מול טכנולוגיות הבנייה הקונבנציונליות.

רצינו לענות על השאלות הבאות:

- א. באיזו מידה כדאי לקבלנים המבצעים לבנות בנייה מודולרית
- ב. באיזו מידה כדאי ליזמים ליזום ולבנות בבנייה מודולרית
- ג. באיזו מידה כדאי למשק שתבנה בנייה מודולרית
- ד. באיזו מידה ותנאים כדאי למשק לרכוש מבנים בבנייה מודולרית מייצור מקומי.

- לאחר ביצוע חישוב כדאיות כלכלית עבור השוואה של 2 בניינים בני 20 קומות, הגענו לתשובות הבאות:
- א. מבחינת עלויות הבנייה לקבלן מצאנו כי העלות למ"ר בנוי בבניין קונבנציונלי היא 6,756 ₪ ובבניין מודולרי 6,520 ₪ למ"ר. משמע, המעבר לבנייה מודולרית כדאית עבור הקבלן.
 - ב. לאור העלויות הנתונות ואחוז היוון עלויות של 4% בשנה – הרווח ליזם הבונה בבנייה מודולרית הוא 24.5 מיליון ₪, לעומת היזם הבונה בבנייה הקונבנציונלית, שהרווח היזמי שלו הוא כ-23 מיליון ₪. אל מול התועלות הכלכליות והלאומיות למשק שהיזם לא רואה לנגד עיניו, מוצעים מודלי תמריץ הבנייה ליזם כמפורט בסעיפי הפרק.
 - ג. במעבר לטכנולוגית הבנייה המודולרית גלום היתרון המרכזי לענף הבנייה - קיצור משמעותי של משך הבנייה, אשר יכול לענות על הצורך הלאומי של ישראל בהגדלת היצע הדירות אל מול ביקושים שהולכים וגדלים לאור הגידול באוכלוסיית ישראל. כמו כן גלומות תועלות נוספות למשק כגון: הפחתת פסולות בנייה, הגברת הבטיחות בעבודה, והפחתת התלות בכוח אדם לא מיומן.
 - ד. לא כדאי למשק, לפחות בשלב החדרה הראשוני, להקים מפעלים מקומיים על מנת לבנות מבנים בבנייה מודולרית מייצור מקומי עקב עלויות הקמת מפעל גדולות, ובעיקר עקב החוסר החריף בכוח אדם הקיים לא רק בענפי הבניין אלא גם בענפי התעשייה.

8.6.10 מראי מקום

- מירב, א., אדריכלות ובנייה בישראל, "חישוב עלויות בנייה ואפשרויות מימון - תחשיב מעודכן". ברק, ב., 2016, "מחיר ההון הפרטי והחברתי, המלצה לחישוב שער ניכיון חברתי", הוגש למשרד להגנת הסביבה.
- בנק ישראל, "ענף הבנייה - נתונים נבחרים, 1970 עד 2017".
- המשרד להגנת הסביבה, 2018, "דוח סיכום ממצאי סקר צריכת חשמל השוואתי בין דירות ירוקות ודירות סטנדרטיות".
- המשרד להגנת הסביבה, 2015, "היבטים כלכליים בהיערכות לשינויי אקלים בישראל".
- המשרד להגנת הסביבה, 2017, "תזכיר חוק שמירת הניקיון".
- המשרד להגנת הסביבה, המועצה הישראלית לבנייה ירוקה, 2017, "חדשנות בענף הבנייה בישראל".
- התאחדות בוני הארץ, 2018, "בונים את ישראל".
- התאחדות בוני הארץ בשיתוף עם BDO (1), "ענף הבנייה והתשתיות – סקירת התפתחות לשנת 2016 ותחזית לשנים 2017-2018".
- התאחדות בוני הארץ בשיתוף עם BDO (2), "ענף הבנייה והתשתיות – סקירת התפתחות לשנת 2017 ותחזית לשנת 2018".
- התאחדות התעשיינים, 2018, "העסקת עובדים זרים ומומחים זרים בישראל - עמדת התאחדות התעשיינים".
- חברת החשמל, תעריפי צריכת חשמל, מעודכן ל-2019.

- כהן, ע., 2015, "עלויות בנייה בדירות למגורים, BDO".
 לוי, י., 2018, "עלות בנייה". נובמבר 2018.
 למ"ס, 2018, "התחלות בנייה וגמר בנייה - רביע שלישי של 2018", הודעה לתקשורת מ-19 בדצמבר 2018.
 משרד הבינוי והשיכון, 2015, "רכיבי עלויות הבנייה למגורים ומשקלם במחיר הדירה".
 משרד הבינוי והשיכון, 2016, "תכנית לתיעוש ענף הבנייה בישראל".
 משרד הבינוי והשיכון, 2018, "גיוס עובדים זרים לעבודה".
 משרד העבודה והרווחה, הביטוח הלאומי, 2017, "דו"ח תאונות עבודה ותחלואה תעסוקתית -2012-2016".
 כרמון, ע., 2015, "פיתוח כלים פיננסיים לקידום בנייה ירוקה למגורים בישראל".
 עוז, ע., 2018, "שיפוץ בניינים, מחירון פיגומים".
 קמפ, א., רייכמן, ר., 2008, "עובדים זרים: הכלכלה הפוליטית של הגירת עבודה בישראל". ירושלים: מכון ון-ליר והקיבוץ המאוחד.
 Aye, L., Ngo, T., Crawford, R.H., Gammampila, R., Mendis, P., 2012, "Life cycle greenhouse gas emissions and energy analysis of prefabricated reusable building modules". *Energy and buildings*, 47, 159-168.
 Manley, K., 2015, "Prefab revolution? Factory houses are the secret to green building".
 Hofman, E., Voordijk, H., Halman, J., 2009, "Matching supply networks to a modular product architecture in the house-building industry". *Building Research & Information*, 37(1), 31-42.
 Hong, J., Shen, G.Q., Li, Z., Zhang, B., Zhang, W., 2018, "Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost-benefit analysis". *Journal of cleaner production*, 172, 649-660.
 Jaillon, L., Poon, C.S., 2010, "Design issues of using prefabrication in Hong Kong building construction". *Construction Management and Economics*, 28(10), 1025-1042.
 Lawson, R., Ogden, R., 2005, "Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction". *Transport*, 35(15), 15.
 Lawson, R.M., Ogden, R.G., Bergin, R., 2011, "Application of modular construction in high-rise buildings". *Journal of architectural engineering*, 18(2), 148-154.
 MODCONS D4.1, 2015, "Report on sustainability benefits of modular construction".
 FP7-SME-2012-1 GRANT AGREEMENT N° 315271 SYSTEMS FOR HIGH
 MODCONS DEVELOPMENT OF MODULAR CONSTRUCTION -RISE
 RESIDENTIAL BUILDINGS.

- Olivas, F., Aragonez, O., 2013, "Plug and play—Modular building solutions to reduce lead time, cost and increase flexibility". In 2013 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference (pp. 1-14). IEEE.
- Peltokorpi, A., Olivieri, H., Granja, A.D., Seppänen, O., 2018, "Categorizing modularization strategies to achieve various objectives of building investments". *Construction Management and Economics*, 36(1), 32-48.
- Rogan, A.L., Lawson, R.M., Bates-Brkljac, N., 2000, "Value and benefits assessment of modular construction". Steel Construction Institute, Ascot, UK.
- Tauš, P., Taušová, M., Šlosár, D., Jeňo, M., Koščo, J., 2015, "Optimization of energy consumption and cost effectiveness of modular buildings by using renewable energy sources". *Acta Montanistica Slovaca*, 20(3).
- Xue, H., Zhang, S., Su, Y., Wu, Z., 2017, "Factors affecting the capital cost of prefabrication – A case study of China". *Sustainability*, 9(9), 1512.

פרק 9: סיכום, מסקנות, והמלצות

9.1 סיכום תמציתי

בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל (ובקיצור: בנייה מודולרית) נחשבת בספרות המקצועית הכלל עולמית כטכנולוגית הבנייה המתועשת ביותר הקיימת כיום בענף הבנייה.

במדינות רבות רואים בה פתרון רצוי ואפשרי לתחלואי הענף, הסובל בעיקר מפריון נמוך, תלות כמעט מוחלטת בכוח אדם המוכן לבצע עבודות כפיים קשות בשכר נמוך (אשר הולך ופוחת במדינות המפותחות), משך ביצוע ארוך של הפרויקט באתר הבנייה, ביצוע באתר של עבודות הגורמות למטרדים סביבתיים, פחת גדול של חומרי בנייה והעמסת הסביבה בכמויות גדולות של פסולת בנייה, חוסר דיוק וליקויי איכות בתום הבנייה, רמת בטיחות ירודה בתהליך הביצוע באתר ובעיקר בבנייה גבוהה ורבת קומות, תנאי עבודה קשים לעובדים באתר, חוסר וודאות לגבי עלות הפרויקט ולוח הזמנים בפועל, רמת אמינות נמוכה בין בעלי העניין השונים (כולל בין הרשויות לבין היזם וצוות התכנון שלו, בין היזם לקבלנים, בין הקבלן לקבלני המשנה, ובין היזם ללקוחות), וריבוי תביעות בין בעלי העניין השונים, כולל בין הדיירים לבין היזם. לנוכח כל אלה, יש לענף הבנייה תדמית נמוכה מאוד בעיני הציבור, הרואה בו תחום מקצועי פרימיטיבי, שאינו מדביק את הקדמה שקיימת כיום בכל תחומי הייצור האחרים, כולל בתעשיות הכבדות.

לכל התחלואים האלה הבנייה המודולרית נותנת מענה:

עיקר הפעילות בבנייה מודולרית הוא במפעל, בו מיוצרות יחידות תלת ממדיות גדולות על שולחנות עבודה, לרוב בשיטת סרט נע (כמו בתעשיית המכוניות והאוטובוסים), שבסופו יוצאת יחידה מוגמרת במידות של כ- 3.4 מ' רוחב, כ- 10 עד 16 מ' אורך, וגובה של קומה אחת. שלד היחידה יהווה גם מרכיב עיקרי ולפעמים בלעדי בשלד הבניין הסופי; קירותיה והמחיצות שבה כוללים כבר את הבידוד התרמי והאקוסטי הדרושים, והם יהיו קירות החדרים השונים; ואפילו הצנרת, החיווט, האביזרים החשמליים, הכלים הסניטרים, הריצוף, החלונות והדלתות כבר מותקנים בה. בבנייה לא גבוהה במיוחד, בדרך כלל לא יותר מ- 6 קומות, ניתן לבנות בניין שמבוצע כולו רק מיחידות כאלה. כתלות בפונקציות אחרות בבניין ובגובה הבניין, יידרשו בפרויקט גבוה יותר קומות מסד מבנייה קונבנציונלית וגרעין הקשחה מרכזי בבנייה קונבנציונלית. בבניינים גבוהים המיוחד, בני עשרות קומות, יידרש שלד נפרד והיחידות התלת ממדיות יושחלו לתוכו (ידוע בספרות כ- "בניין מגירות", או "בניין קפסולות"). כשהמפעל אינו רחוק מאוד מאתר הבנייה (בגלל מידותיה הקטנות של ישראל, המרחקים בארץ נחשבים קצרים מאוד באופן בלתי תלוי היכן ימוקם מפעל כזה – אם יוקם בארץ) היחידות משונעות אליו בדרך כלל בהתאם לקצב התקדמות ההרכבה, כך שהיחידה מפורקת מהמשאית ומונפת ישירות אל מקומה הסופי בבניין. כשהיחידות מיובאות ממדינה אחרת בהובלה הימית מתחייב שינוע כמות גדולה של יחידות בבת אחת, ולכן נחוץ אחסון ביניים, הדורש שטח ייעודי והנפות ביניים. באתר הבנייה

מבוצעות אומנם עבודות קונבנציונליות במערכת התת-קרקעית, בקומות מסד כאשר הן קיימות, ובגרעין ההקשחה המרכזי. אך בכל החלק המבוסס על בנייה מודולרית, שהוא מרבית שטח הבנייה, מבוצעות אך ורק עבודות יבשות הכוללות שימה ופילוס של היחידות, ביצוע חיבורים בין היחידות ובינן לבין גרעין ההקשחה, חיבור חלקי מערכות השירות היוצאים מהיחידות אל המערכות המשותפות, ביצוע חסימות אש ואיטום מישקים, ובגג הבניין התקנת שכבות הבידוד ומערכת השיפועים והאיטום של הגג. ייצור היחידות במפעל מתקיים במקביל במספר קווי ייצור ומתקדם עם הדרישה להן באתר הבנייה. התקדמות הבנייה באתר היא מהירה מאוד ובדרך כלל מתאפשרת הרכבה של כ- 6 עד 10 יחידות ביום עבודה. אחד המאפיינים העיקריים של הבנייה המודולרית הוא, לפיכך, סיום מהיר מאוד של כל הפרויקט, תוך קיצור השהות באתר בעשרות אחוזים.

בשל הביצוע של כל העבודות במפעל בגובה עבודה נמוך ובנגישות טובה לכל מרכיב, בתנאי עבודה נוחים, בתנאי בטיחות מעולים, ובמסגרת תעסוקתית בטוחה ומתמשכת, הדיוק והאיכות של היחידות בכללותן ושל מרכיביהן הפרטניים גבוהים מאלה שמתקבלים בבנייה הקונבנציונלית. העבודה המתוכננת היטב במפעל מאפשרת גם הקטנה ניכרת של כמויות פסולת הבנייה ומחזור של חלק ניכר ממנה. ההפחתה הניכרת בשעות כוללות של כוח אדם באתר והעדר עבודה בזמנית של עובדי קבלן מסוגים שונים מקטינה את החשיפה לתאונות עבודה, ותורמת להגברת הבטיחות בעבודה. יחד עם זאת התלות בעבודה עם עגורנים כבדים המניפים יחידות כבדות מהווה סיכון בטיחותי המחייב התארגנות הולמת. על אף השינוע של כ- 6 עד 10 יחידות מודולריות ליום אל האתר, רמת התנועה הכוללת של משאיות אל האתר וממנו פחותה מזו שבבנייה הקונבנציונלית היות שכמעט ואין שום שינוע של חומרים ורכיבים אחרים. בהיותה יבשה בעיקרה, העבודה באתר כמעט שאינה מפריעה לסביבה.

בבנייה מודולרית חייבים לסיים את התכנון על כל פרטיו לפני תחילת ייצור היחידות, וכמעט שלא קיימת גמישות לשינויים בתכנון תוך כדי הביצוע. זה דורש כמובן שינוי תפיסתי מוחלט של תהליך התכנון, ולכן סביר להניח שבתחילת הדרך תהיינה תקלות שנובעות מנורמות התנהלות ישנות, עד אשר היתרונות של התפיסה החדשה ייטמעו וכל בעלי העניין יתרגלו לתפיסה החדשה. מכל מקום, בזכות התכנון המפורט מראש, ניתן לתכנן מראש גם את לוח הזמנים, העלויות, ותזרים המזומנים לכל התהליך ואלה מתממשים בדרך כלל ללא סטיות ניכרות. כתוצאה, רמת האמינות של כל ההתקשרויות גדלה ומאפשרת בדרך כלל סיום הפרויקט ללא תביעות הדדיות.

הבחינה הכלכלית, שנערכה במסגרת המחקר ולקחה בחשבון שלפחות בשלב ראשון של החדרת הטכנולוגיה לבנייה לגובה בישראל יתחייב שינוע של היחידות מחו"ל, הראתה שגם מבחינה כלכלית יש לבנייה המודולרית סיכוי גבוה להיות עדיפה על הבנייה הקונבנציונלית. בתנאים מסוימים בנייה זו תהיה אפילו רווחית יותר ליזם הבודד (כאשר עלות התשומות הישירות קטנה בכ- 10% או יותר מזו שבבנייה הקונבנציונלית, דבר שיש לו סיכוי להתממש כשבנייה זו תהפוך שגורה יותר), אך עיקר הכדאיות הכלכלית היא בהיבט המקרו כלכלי מנקודת המבט הרחבה של המדינה, וזאת בזכות התועלות הנוספות הנובעות מחיסכון בפסולת ובאנרגיית ייצור, הפחתת מטרדים והגברת הבטיחות.

לנוכח כל אלה, הטכנולוגיה של בנייה מודולרית נחשבת כבעלת פוטנציאל לקידום ענף הבנייה, לשיפור מהותי של תדמיתו, ולהעלאתו לרמה מקבילה לזו של התעשיות הכבדות האחרות, כגון תעשיית המכוניות, האוטובוסים, המטוסים, המכולות, והאוניות.

על אף היתרונות המובהקים, שהוכחו כבר בפועל בפרויקטים רבים בחו"ל, והפוטנציאל הגלום להשגתם גם בישראל, יש לטכנולוגיה זו גם חסרונות שיש הכרח למנוע מראש את תוצאותיהם השליליות אם לא יטופלו כהלכה. אחד החסרונות העיקריים של הבנייה המודולרית עבור בנייה שאינה נמוכה הוא היותה "חדשנית" (הן בהיבט של טכנולוגית הייצור והביצוע באתר, הן בשימוש בחומרים ורכיבי בנייה, והן בתהליך הכולל של מימושה ובמערכת היחסים הכוללת בין כל בעלי העניין). חדשנות מטבעה מלווה, בכל תחום בו היא מתממשת, בחוסר הכרות מלאה של כל הגורמים המעורבים עם כל פרטיה ורזיה, ולכן בחוסר ביטחון ובחשש לקחת אחריות. חסרונות נוספים הם: היחידות מבוצעות בדרך כלל בבנייה קלה ויבשה, המחייבת היכרות מקצועית עם רזי התכנון, התכן ופרטי הבניין של בנייה מסוג זה, בעוד שלחלק מהאדריכלים והמהנדסים העוסקים בעיקר בבנייה קונבנציונלית חסר ידע מתאים; אילוצי שינוע הנובעים מתנאי הדרך לאתר ספציפי עלולים להכתיב מידות שונות מהסטנדרטיות לשיטת הבנייה הספציפית של המפעל; השינוי התפיסתי הדרוש בתהליך התכנון, כמוסבר לעיל, הנובע מהצורך בתיאום כל בעלי העניין מראשית תהליך הייזום של הפרויקט, מהצורך לסיים את כל התכנון והתכן לפני תחילת הייצור של היחידות במפעל, ומגמישות מוגבלת מאוד לשינויים תוך כדי תהליך הביצוע.

על כל החסרונות האלה ניתן להתגבר בהיערכות מתאימה של אנשי המקצוע והיזמים המעוניינים בקידום הטכנולוגיה, ואז הם לא יהוו חסם בפני החדרתה. יחד עם זאת, לצד החסרונות הללו הובחן חסם בעייתי שאינו טכנולוגי, החוזר ומופיע גם בחו"ל, והוא סטיגמה ודעות קדומות שהתקבעו כנגד בנייה טרומית בכלל, הגורמים לאי וודאות לגבי התגובה של רוכשי דירות פוטנציאליים. אי וודאות מסוג זה קשה לנטרל כל עוד לא מנתצים את הסטיגמה.

בשל החסרונות והחסם העיקרי המפורטים לעיל, אם מעוניינים להחדיר בנייה מודולרית לענף הבנייה הישראלי, חייבים להיערך לכך כהלכה, כמפורט בסעיף הבא.

9.2 החשיבות הקריטית של היערכות מוקדמת

חלק מההיערכות המוקדמת שכבר ננקטה על ידי המשרד, כדי להתגבר על מכשול פערי הידע שנובע מה"חדשנות", הוא ההזמנה של דו"ח זה, שבפרקיו השונים מנגיש היכרות מקצועית ראשונית עם הטכנולוגיה, ובעיקר עם הספרות המקצועית והניסיון המצטבר הכלל עולמי הקיימים בנושא (ע"י סקר הספרות המפורט מאוד בנספח א', והתמצית שלו בפרק 5), ועם היבטים ספציפיים של תכנון, ביצוע וניהול הבנייה (תתי פרק 8.1 עד 8.5 בפרק 8).

הסיכוי שיזם ייטול סיכון ויחליט על דעת עצמו לבצע פרויקט של בנייה גבוהה בטכנולוגיה כה חדשה לגביו הוא קטן. כפי שהתקבל מסקר עמדות שבוצע במסגרת המחקר, וכפי שגם קרה במספר ניכר של

מדינות בחו"ל (ובעיקר בסינגפור), הגוף העיקרי שיכול ואמור להיות הכוח המניע של תהליך ההחדרה של טכנולוגיה זו לבנייה הגבוהה בארץ הוא המערכת הממשלתית, ובעיקר משרד הבינוי והשיכון (להלן: המשרד), וזאת על ידי הובלת מספר קטן של פרויקטי פיילוט בשנים הקרובות.

על מנת למקסם את יתרונותיה של הבנייה המודולרית, יש להחדירה בזירות מרבית, תוך הצבת יעדים ברורים עם רף מטרה גבוה מאוד בכל תחום רלוונטי, ובעיקר בתחומים של שיפור האיכות, היעילות והפריון, הבטיחות בעבודה, הקיימות, והאמינות של כל התהליך.

בשלב הראשון יש להיזהר מ"התלהבות יתר" ומהרצון לראות תוצאות מיידיות. בכל החדרה של חדשנות קיימת עקומת למידה שחייבים לקחת בחשבון, ולכן רצוי להיערך בהתאם ולקבוע מסגרת מוגבלת ותחומה היטב של פעילות פרויקטיבית להחדרת הטכנולוגיה, אשר תניף על דגלה את ערך ה"מצוינות", ותתבסס על כמות קטנה של שחקנים איכותיים בלבד שייבחרו על פי קריטריונים מוגדרים מראש עם סף מעבר גבוה מאוד.

9.3 מסקנות והמלצות

לבנייה מודולרית סיכוי גבוה לקצר את משך הביצוע של פרויקטי בנייה בכ- 35% - 65%; להקטין את הדרישה לכוח אדם באתר הבנייה בכ- 50% - 75%, ועקב זאת לשפר את הפריון באתר הבנייה בעשרות עד מאות אחוזים; להפחית את שיעור תאונות העבודה באתר בכ- 80% ויותר, ואת הבטיחות הכוללת פי 3 עד 4 למשך כל הפרויקט; לצמצם פסולות בנייה בכ- 90%, אספקות לאתר בכ- 60%, והסעות עובדים וחומרים לאתר בכ- 70%; ובנוסף לכל אלה לשפר באופן מהותי את תנאי העבודה של כל העוסקים במלאכה.

מבחינות אלה לבנייה המודולרית סיכוי גבוה לשפר את תדמית ענף הבנייה ולהעבירו ממעמד של ענף פרימיטיבי עתיר כוח אדם בלתי מיומן, לענף מתועש ומתקדם.

לנוכח היתרונות והסיכוי הגבוה לכדאיות כלכלית של הבנייה המודולרית, מומלץ לבצע, כאמור, פרויקט פיילוט בהובלה של משרד הבינוי והשיכון, אשר יעניק תמריץ ליזמים שייכללו בפיילוט. בהעדר מפעלים קיימים בישראל שהם בעלי ניסיון מוכח בבנייה מודולרית לגובה, מומלץ שבשלב הראשון (כנראה בשלוש השנים הראשונות) היחידות התלת ממדיות יובאו ממפעל מחו"ל. כמו כן מומלץ שבתחילת התהליך המפעל יספק גם צוותי הרכבה מיומנים שיוצמדו להם צוותים ישראלים שילמדו את העבודות, על כל מרכיביהן (חיבורים, פרטי איטום, חסימת אש, וכד').

כדי שיזמים לא יירתעו מהשתתפות בפיילוט עקב רמה גבוהה מדי של אי וודאות ונטילת סיכונים, יש לבצע את הפיילוט במסגרת של תמרוץ/פיצוי. במסגרת המחקר פותחו מספר מודלים אפשריים של תמרוץ/פיצוי, הכוללים: A – מודל רשת ביטחון עם תמריץ התנהגותי, שניתן ליישמו ברמת הדירה או ברמת הבניין השלם, B – מודל רשת ביטחון ותמריץ על בסיס הקלות מיסוי, C – מודל ליסינג ומכירה

בסוף התקופה. שלושת המודלים מפורטים ומודגמים בסעיף 8.6.8, וההחלטה לגבי המודל המועדף ואופן יישומו צריכה להתקבל על ידי המערכת הממשלתית המנהלת את הפיילוט.

לקראת הפעלת הפיילוט **נדרשת היערכות מוקדמת**, אשר צריכה לכלול יצירת תשתית שיטתית וברורה, המגדירה לכל יזם שמעוניין להיכנס לתהליך הפיילוט את כל הנדרש ממנו על מנת להיות מועמד לכך.

כחלק מההיערכות רצוי להקים ולהפעיל **וועדה מקצועית לצד המשרד**, אשר תסייע בקביעת הקריטריונים לבחירת פרויקטי הפיילוט, ובבחינה של ההצעות שיוגשו בעקבות מכרזים בנושא.

בכל תהליך שייבחר לביצוע הבחירה של הזוכים להשתתף בפיילוט, יש להבטיח **שלמצוינות ההצעה יש מרכיב גבוה בזכייה**.

כתנאי מוקדם להבטחת אובייקטיביות והחלטות איכותניות, יש לוודא **ששיטות הבנייה הספציפיות**, שתהיינה מועמדות להשתתף בפיילוט, **הוכיחו את התאמתן למכלול הדרישות** התכנוניות והביצועיות, וככל שיטת בנייה חדשה, **נבחנו ואושרו** במסגרת היחידה לבחינה ולאישור של שיטות בנייה חדשות במכון הלאומי לחקר הבנייה.

מומלץ **ללוות את הפיילוט במחקר במסגרתו יבוצע מעקב צמוד אחרי הביצועים המושגים בפועל** מבחינת התהליך (החל משלבי התכנון הראשוניים ושיתוף פעולה של כל הגורמים בעלי העניין, עבור דרך תהליכי השינוע, הרכבה, ועבודות גמר בבניין), מבחינת לוחות הזמנים, האיכות, ונקודות התורפה המתגלות בפועל.

נספח א': סקר ספרות מפורט

בנספח זה נתון סקר ספרות מפורט של מכלול המאמרים, הדוחות, הספרים, ואתרי האינטרנט הרשמיים שעמדו לרשות צוות המחקר במהלך ביצוע המחקר. ברוב תתי הפרק הסקירה בוצעה בסדר כרונולוגי על מנת לתעד, בין היתר, את ההתקדמות שחלה בהצטברות הידע ובמחקר בתחום זה. בסופו של כל תת-פרק בסקר ספרות זה נתונה הרשימה (לפי סדר א"ב של המחברים) של מראי המקום המנותחים בו.

א-1. היבטים כלליים של תיעוש בנייה

Jaillon and Poon 2009

סוקר את נושא תיעוש הבנייה בהונג קונג. תחילה סוקר בתמצית את רמת ההחדרה של בנייה טרומית מבטון לענף הבנייה במדינות שונות, ולאחר מכן סוקר בהרחבה את המצב בהונג קונג. מדגיש שתיעוש נועד להגביר פריון, לשפר איכות ולהתמודד עם מחסור בכוח אדם לא מיומן. מציין שבהונג קונג הבנייה המתועשת הייתה נהוגה במגזר הבנייה הציבורית למגורים, אך לא בפרטית. בגלל הצורך בהגברת קצב הבנייה ואיכותה ננקטו, מאז 2001, פעולות פרואקטיביות להגברת התיעוש, כגון הענקת הגדלה של שטח הבנייה. בנייה מתועשת עם יחידות תלת-ממדיות אינה קיימת כלל (למעט פרויקט תיאורטי – Integer Project - בן 40 קומות, בו כל דירה הייתה אמורה להיבנות מחמש יחידות מודולריות תלת ממדיות, שלא זכה להיבנות). יש מעט מאוד יישום של יחידות תלת-ממדיות לחדרי רחצה ולמטבחים (2%-3% בלבד של הפרויקטים). המגבלות העיקריות ליישום שכיח יותר הן: הובלה, העברה לאתר, ואחסון באתר, בעיקר בסביבה אורבנית צפופה כמו הונג-קונג.

Lu 2009

סוקר את נושא התיעוש בארה"ב ומתמקד ביתרונות, חסמים וכד'. המחקר בוצע באמצעות שאלונים שנשלחו ל 1200 אנשי מקצוע (מהנדסים, אדריכלים וקבלנים), וניתוח סטטיסטי של הממצאים. לצורך הכנת השאלונים בחנו תחילה מספר טכנולוגיות לעומק וראינו גורמים מקצועיים הקשורים להן. תשובות ראויות לניתוח התקבלו מ- 131 משיבים (67 אדריכלים ומהנדסים, ו- 64 קבלנים). ממצאים עיקריים:

יתרונות: קיצור משך הפרויקט; שיפור איכות המוצר; הגברת הפריון; הגברת הבטיחות באתר הבנייה; הפחתת ההשפעה השלילית על הסביבה.

חסמים: אילוצי שינוע המשפיעים על מידות הרכיבים, עלות, והיבטים קונסטרוקטיביים של הרכיבים בעת השינוע; חוסר אפשרות לבצע שינויים באתר. חסמים אלה מהווים לפיכך אתגר לאנשי המקצוע בבואם להחדיר טכנולוגיות מתועשות.

גורמים מניעים לקידום התיעוש: הפחתת משך הביצוע באתר; הפחתת משך הביצוע הכולל של פרויקט; הפחתת העלות הכוללת של הפרויקט. הקבלנים הוסיפו גם את הגורם של הפחתת ההשפעות של שינויי מזג אוויר על תהליך הביצוע.

כדי להתגבר על החסמים והאתגרים מוצע להגביר את המחקר בתחום; לפתח מסגרות הכשרה מתאימות להגברת היכרות עם התחום בקרב אנשי המקצוע; לשפר ולפתח מערכות אשרור ותיעוד חדשות; להגביר את שיתוף הפעולה בתהליך התכנון והתכן על מנת להפחית את הצורך בשינויים באתר.

National Research Council 2009

וועדה בנושא שיפור התחרותיות והפריון בענף הבנייה האמריקאי, אשר הוקמה על ידי המועצה הלאומית האמריקאית למחקר (National Research Council) קיימה סדנאות ודיונים עם אנשי מקצוע והגיעה למסקנה שניתן להגיע לפריצת דרך בענף תוך זמן קצר מאוד (2 עד 10 שנים) ואין צורך לתכנן את השינויים לאופק ארוך יותר (המטרה ההתחלתית הייתה קידום הענף תוך 20 שנה). מטרת השינויים כוללות הגברת היעילות והפריון, שיפור האיכות, הפחתת משך הביצוע, והגברת האפקטיביות של ההשקעה.

הגורמים העיקריים שאותרו כמובילים לפריצת הדרך כוללים: יישום BIM לכל אורך התהליך; שיפור הממשקים בין כוח אדם, תהליכים, חומרים, ציוד ומידע; הגברת התיעוש באמצעות ייצור מחוץ לאתר ויישום בנייה מודולרית; יישום נרחב של הדגמות, בעיקר של טכנולוגיות חדשות; מדידה שיטתית ויעילה של ביצועים בפועל על מנת לעודד יעילות וחדשנות.

הממצאים העיקריים הנוגעים להגברת התיעוש כוללים:

- הפריון באתר נמוך בגלל התנאים הסביבתיים הלקויים (אבק, רעש, אקלים, קשיים פיסיים, וסיכוני בטיחות).
- ייצור במפעל מתגבר על חלק ניכר של בעיות אלה ומפחית את עוצמתן. מעבר לחומרים קלים מגדיל את הפריון בכ- 30%.
- שימוש בחומרים ורכיבים מוכנים להתקנה מגדיל את הפריון.
- משך הפרויקט מצטמצם באורח ניכר בזכות התיעוש.
- תיעוש מפחית את כמות הקונפליקטים בתזמון עובדים, ומשפר את הבקרה על לוח הזמנים של עבודת אנשי המקצוע השונים.

- שטחי אחסון לחומרים באתר פוחתים ומצטמצם הפחת הנובע מאובדן, השחתה וגניבה של חומרים.
- הגברה של הבטיחות בעבודה וצמצום הנזקים לעובד.

Zabihi et al. 2013

המאמר מדגיש את היתרונות של תיעוש להשגת קיימות (ללא התמקדות בבנייה מודולרית). התנאי הוא הקפדה על ערכים סוציאליים (אינדיבידואליות וזהות סוציאלית), מחד גיסא, והיתרונות הטכנולוגיים (זירוז התהליך, הגברת הבטיחות, הבטחת איכות, הפחתת פסולות וכו'), מאידך גיסא.

כורך הכל בהצגה דו-ממדית כמוצג בתרשים המצוטט מהמאמר:

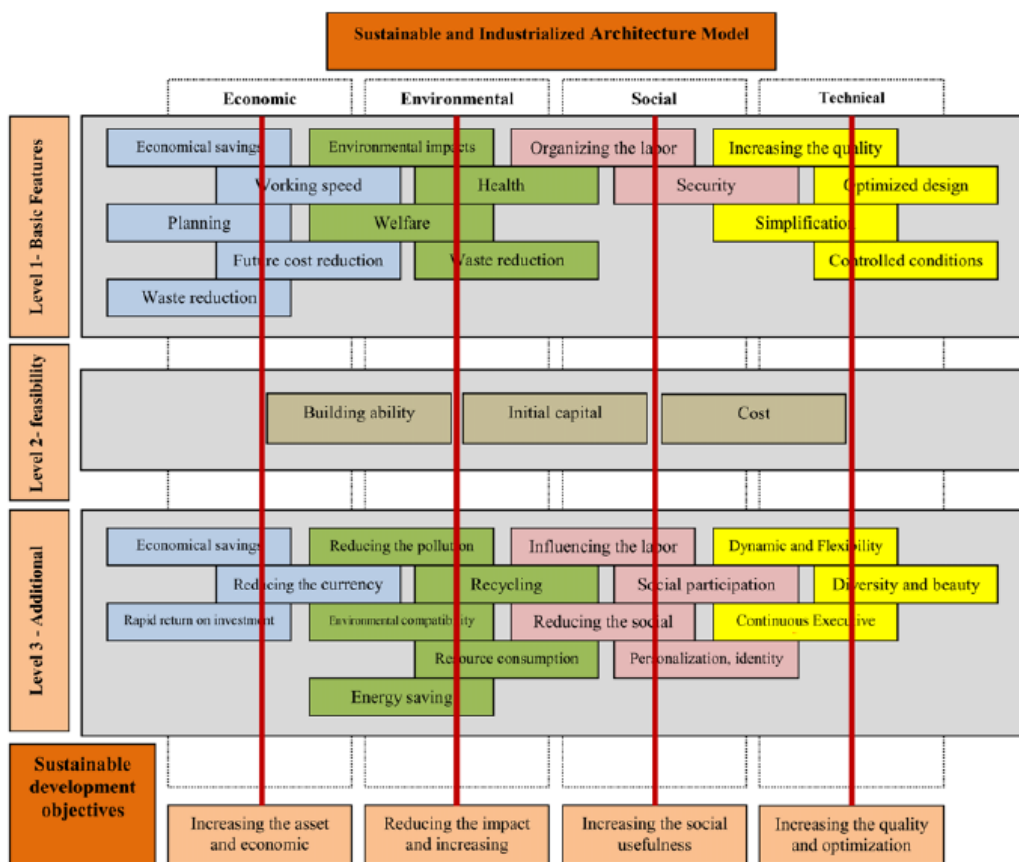


Fig. 1. Model of Sustainable Industrialized Building System (SIBS)

Grills 2013

עבודת גמר של סטודנט באוניברסיטה בארה"ב. עוסק בעיקר בניתוח התיעוש של בנייה נמוכה למגורים. מדגיש את היתרונות של: הגברת פריון ויעילות, קיצור משך הפרויקט, הפחתת פסולות והשפעה שלילית על הסביבה, שימוש באוטומציה במפעל, בקרת לוחות זמנים טובה יותר, הגברת איכות בזכות אווירת המפעל והאפשרות להגן מפגעי מזג האוויר, שליטה טובה יותר בפרטי בניין (בידוד, איטום וכד').

החסרונות העיקריים שהוא מונה: הצורך לקחת בחשבון את הטכנולוגיה בשלב התכנון, חוסר גמישות לשינויים מאוחרים, תשומות כספיות גדולות במפעל.

המאמר אינו מתמקד בבנייה לגובה, ובפרט אינו מתמקד בשימוש ביחידות תלת-ממדיות.

Rostami et al. 2013

מדגיש שתיעוש במלזיה נחוץ על מנת להתגבר על מחסור בכוח אדם מקומי (כ- 69% מכוח האדם בבניין הוא זרים), פרויון נמוך, בטיחות נמוכה בעבודה, ובקרת איכות נמוכה.

אין התמקדות בשימוש ביחידות תלת-ממדיות.

Brown 2014

חברת מרשימה המסכמת את נושא הבנייה המודולרית מנקודת המבט של ארכיטקטית בעלת רוח חדשנית, במסגרת פרויקט החדשנות של פירמת הארכיטקטים Hickok Cole בושינגטון די.סי.

הנושאים מוצגים, אומנם, בצורה די עממית, אבל הם מקיפים את מירב ההיבטים הרלוונטיים: תכנוניים, הנדסיים, סביבתיים, חברתיים, כלכליים ועוד, ומלווים בצילומים ובאיורים מרהיבים. כמו כן מוצגים שיקולים ליישום של בנייה מודולרית לבניינים רב-משפחתיים באזור של וושינגטון DC.

Rahman 2014

המאמר עוסק בניתוח הקשיים בהחדרת שיטות בנייה חדשות, ובהן גם בנייה מודולרית. עיקרו של המאמר הוא זיהוי, מיון וקיבוץ של הגורמים המרתיעים מפני חדשנות בבנייה, על-בסיס סקירת ספרות נרחבת. הוא מזהה 8 קבוצות ראשיות של מכשולים בפני חדשנות בבנייה:

1. עלויות,
2. עניינים מקצועיים,
3. מוטיבציה ותרבות,
4. כלים ותקנים,
5. קבלה על-ידי השוק,
6. מאפייני ענף הבנייה,
7. ממשקים וגמישויות,
8. מאפיינים פרויקטליים.

אין למחבר פתרונים לקשיים, אלא המלצה כללית לכל המנסים להחדיר חדשנות לבנייה: להבין, בכל מקרה לגופו, היכן הקשיים העיקריים, ולטפל בהם בהתאם.

Zhengdao et al. 2014

המחברים כורכים יחדיו שיטות בנייה מתקדמות שונות, תחת השם הכוללני Off-Site Construction. הם מנסים להבין ולפענח את המניעים והמכשולים של בעלי העניין המגוונים ולהסביר את האחוז הנמוך

כל-כך (אחוז חד-ספרתי) של בנייה מתועשת בהוגג-קונג, אשר, לכאורה, זקוקה עד מאד ליתרונות של הבנייה המתועשת. הממצא העיקרי שלהם הוא שבקרב בעלי העניין הרבים, אין לאף אחד אינטרס חזק במיוחד לשנות מן הבנייה הרגילה והמוכרת – הבנייה הקונבנציונלית. כל אחד מן הגורמים רואה, כנראה, יותר את הסיכון שבשינוי מאשר את הסיכוי שבשינוי.

Farnsworth 2015

אחד הארכיטקטים המובילים בקבוצת ARUP מונה שלוש סיבות עיקריות לעובדה שהבנייה המודולרית לא "תפסה" נתח שוק הראוי לה בבניינים גבוהים.

הסיבה הראשונה: שיטות ההתקשרות הנפוצות (Design – Bid – Build) מפספסות את המועד שבו צריך להחליט על בנייה מודולרית. אם לא הוחלט על כך בתחילת התכנון – אז בדרך כלל כבר יהיה מאוחר מדי להכניס לפרויקט בנייה מודולרית.

הסיבה השנייה: טכנולוגיה והשקעות – רוב השיטות המודולריות הקיימות תוכננו לבנייה נמוכה עד בינונית. התאמתן לבנייה גבוהה מאד אינה אופטימלית וכרוכה בהרבה פשרות וויתורים.

הסיבה השלישית: שרשרת האספקה הקיימת אינה ערוכה לכך. אין יצרנים גדולים דיים בשביל פרויקטי ענק, והקיימים חוששים לעשות השקעות ענק בשביל פרויקט מובטח אחד ויחיד.

על-אף הקשיים, הכותב אופטימי ומאמין שבהדרגה ייווצרו התנאים לשימוש בבנייה מודולרית בפרויקטי ענק של בניינים גבוהים.

Goh and Loosemore 2017

המחברים טוענים שיש הבנה מועטה בלבד לגבי ההשפעה של החדרת בנייה מודולרית לענף הבנייה על קבלני המשנה בתחום המערכות הסניטריות והמכניות. בהעדר מידע בספרות הם בצעו מחקר ראשוני שבחן עמדות של אנשי מקצוע בכירים בשש חברות גדולות של קבלני משנה באוסטרליה, אשר התנסו במספר פרויקטים של יישום יחידות מודולריות של חדרי אמבטיה, שהיא הבנייה המודולרית הנפוצה ביותר באוסטרליה. הבדיקה בוצעה מתוך נקודת המבט המבוססת משאבים (RBV) של החברות, תוך התייחסות למשאבים הבאים: כספיים, פסיים, ארגוניים, אנושיים, אינטלקטואליים, וסוציאליים. הממצאים הראו שההשפעה העיקרית היא על משאבי כוח אדם, ועל המשאבים הכספיים, האינטלקטואליים והסוציאליים.

א-1.1 מראי מקום

Brown, A.R., 2014, "Fabulous Pre-fab, Applying Modular Construction to Multifamily Residential Projects in Washington, DC". Hickok Cole Architects.

Farnsworth, D., 2015, "Modular Construction in Tall Buildings". CTBUH Journal 2015, Issue IV, Council on Tall Buildings & Urban Habitat.

- Goh, E., Loosemore, M., 2017, "The impacts of industrialization on construction subcontractors: a resource based view". *Construction Management and Economics*, 35:5, 288-304.
- Grills C., 2013, "Industrialization of the Construction Industry through Prefabrication and Adoption of Current Technologies". Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Bachelor of Science in Wood Products Processing, The Faculty of Forestry.
- Jaillon, L., Poon, C.S., 2009, "The evolution of prefabricated residential building systems in Hong Kong: A review of the public and the private sector". *Automation in Construction* 18 (2009) 239–248.
- Lu, N., 2009, "THE CURRENT USE OF OFFSITE CONSTRUCTION TECHNIQUES IN THE UNITED STATES CONSTRUCTION INDUSTRY". *Construction Research Congress on Building a Sustainable Future*, ASCE 2009.
- National Research Council, 2009, "ADVANCING THE COMPETITIVENESS AND EFFICIENCY OF THE U.S. CONSTRUCTION INDUSTRY". Committee on Advancing the Productivity and Competitiveness of the U.S. Industry Workshop Board on Infrastructure and the Constructed Environment Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council, The National Academies Press.
- Rahman, M.M, 2014, "Barriers of Implementing Modern Methods of Construction". *JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING © ASCE /JANUARY/FEBRUARY 2014 / 69*.
- Rostami, R., Lamit, H., Khoshnava, S., Rostami, R., 2013, "INDUSTRIALIZATION AND SUSTAINABLE CONSTRUCTION – A CASE STUDY OF MALAYSIA". *Asian Jr. of Microbiol. Biotech. Env. Sc.* Vol. 15, No. (2) : 2013 : 433-440.
- Zabihi, H., Habib, F., Mirsaeedie, L., 2013, "Definitions, Concepts and New Directions in Industrialized Building Systems (IBS)". *KSCE Journal of Civil Engineering* (2013) 17(6):1199-1205.
- Zhengdao L., Geoffrey Q.P.S., Chuang J., and Jingke H., 2014, "Stakeholder-Based Analysis of Drivers and Constraints in the Use of Off-Site Construction". *ICCREM 2014: Smart Construction and Management in the Context of New Technology*, ASCE 2014

א-2. תיאור כללי של בנייה עם יחידות מודולריות תלת ממדיות

Gorgolewski et al. 2003

מדריך הכולל בפרקים שונים תיאור עקרוני של טכנולוגיית הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות. הוא מתייחס אך ורק לבנייה מפלדה, כאשר האלמנטים השונים (קירות, תקרות ורצפות) מבוצעים בדרך כלל מפרופילי פח פלדה מעוצב בקר (בדרך כלל בצורת C עם גובה דופן של 65-200 מ"מ ועובי דופן 1.2-2.4 מ"מ), למעט מקרים בהם ההשענה היא נקודתית ויש צורך בעמודי פינה, ו/או עמודי ביניים, מפרופילי SHS מעורגלים בחם. קירות ותקרת היחידה מוגמרים בצידם הפנימי בשכבה אחת או שתיים של לוחות גבס, כתלות בעמידות האש הנדרשת לפי גובה הבניין. הרצפה המתוארת כוללת לוח גבס ומעליו לוח שבבי עץ וריצוף קל. קירות חוץ מחופים בצד החיצוני של מסגרת הפלדה בלוח חיפוי עבה ועמיד ברטיבות (Sheathing Board) ומעליו שכבת בידוד תרמי נוספת המבטיחה את המניעה של גשרים תרמיים שנובעים מריבוי רכיבי הפלדה של מבנה הקיר. הגימור החיצוני הדקורטיבי יכול להיות חלק ממבנה היחידה או לבוא כתוספת הבנויה בתום ההרכבה על פני כל החזית (כגון חיפוי בלבנים בבנייה נמוכה, או לוחות אלומיניום בבנייה גבוהה).

Lawson et al. 2005

בחלקו הראשון המאמר מציין שתיעוש באמצעות בנייה טרומה מחיש את הבנייה, מגדיל את האיכות, ומפחית את ההשפעה השלילית על הסביבה, כאשר בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות היא ברמת תיעוש גבוהה במיוחד, ומתאר בקצרה מספר פרויקטים בבריטניה שבוצעו בבנייה בטכנולוגיות מסוג זה. כמו כן מציין את המגבלות של בנייה טרומה הנובעות מהעלויות הכרוכות בהקמה של מפעל, בתכנון מפורט, בבדיקות איכות, ובתקורה גבוהה של מפעל קבוע שחלים עליו מסים שונים. מדגיש שהידע במקצועות ההנדסה והאדריכלות התקדם מאוד מאז שנות ה-60 של המאה הקודמת, ולכן כיום קיימת תשתית תכנונית מתאימה יותר להגברת התיעוש (לעומת המצב שהתקיים אז והיווה מחסום לתיעוש).

בהמשך המאמר מתאר באופן כללי את הסוגים הבאים של בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות: היחידות מיוצרות מקירות נושאים עם מערכת נושאת של מסגרות מישוריות מפרופילי פלדה מעוצבים בקר. התקרות מיוצרות כקסטות מישוריות עם קורות מפרופילים כנ"ל. מידות היחידה נקבעים על פי אילוצי התנועה (בבריטניה לכל היותר 4 מ' ללא ליווי משטרת).

מבחינה סטטית מבחינים בין שני סוגי יחידות:

- יחידות עם סמכים רציפים והשענה מלאה: קירות היחידה הם קירות נושאים והעומסים האנכיים מועברים באופן רציף מיחידה ליחידה באמצעות מגע מלא בין הקורות שבתחתית היחידה וראשי הקירות שביחידה מתחתיה. במקרה זה היחידות מוערמות זו על זו, חייבת להתקיים רציפות של הקירות לגובה הבניין, והפתחים בקירות מוגבלים בגודלם. יחידות כאלה מתאימות לחדרים

רטובים, ולחללים שרוחבם מותאם לרוחב האפשרי של היחידות, כך שאין צורך בפתחים גדולים על מנת לייצר את החלל הפונקציונלי.

- יחידות עם השענה על סמכים בודדים: היחידות נשענות על הפינות ו/או נקודות השענה בתוך תחום הקירות, כאשר חייבים להבטיח את רציפות העמודים לכל גובה הבניין. במקרה זה אפשר לייצר פתחים גדולים מאוד בקירות, כולל אפשרות ליחידות ללא קיר אחד או יותר. יחידות כאלה מתאימות לכל מקום בו נדרשים חללים פונקציונליים שמידותיהם גדולות מרוחב היחידה. הקורות ההיקפיות במקרה זה גבוהות יותר.
- יחידות שאינן נושאות.

מבחינת המבנה מבחינים בסכימות הבאות:

- מבנה עם פודיום תחתון של קומה או יותר בבנייה רגילה, עליו נשענות היחידות. המרחקים בין העמודים בקומות הפודיום מתואמים עם מידות היחידות, כך שבכל מודול של עמודים מורכב מספר שלם של יחידות.
- מבנה שלדי בחלקי הבניין עם מפתחים גדולים (סלון) משולב עם יחידות נושאות מוערמות באזורים הצפופים (כגון מטבחים, חדרים קטנים, וחדרי שירותים).
- מבנה שלדי בו יחידות שאינן נושאות נשענות על התקרות של השלד. במקרה זה עמודי השלד עוברים ברציפות לגובה הבניין, ויש להבטיח שפינות היחידות כוללים מגרעות שמתאימות לכך.



Fig 9.
Continuously
supported module in
light steel framing



Fig 10.
Corner-supported
module

Fig 17.
Installation of
modules with
recessed corners
around SHS columns
(courtesy of
OpenHouse AB)



Lawson and Ogden 2008

המאמר חוזר על תיאורים ממאמרים קודמים של אותו מחבר. מידע נוסף ייחודי למאמר זה, כולל: עד 6 קומות היחידות יכולות לשאת את העומסים האנכיים והאופקיים. עבור האחרונים יש צורך בהקשחת הקירות באמצעות אלכסונים או דיאפרגמות. בבנייה של 6 עד 10 קומות יש צורך במערכת

הקשחה נפרדת שמבוססת על הגרעין של מהלכי המדרגות ופירי המעלית והשירות. העברת הכוחות מהיחידות נעשית באמצעות חיבורים בין היחידות (פלטות והברגות) ובסיוע של אלכסונים בקירות המסדרונות. בבניינים מעל 10 קומות נדרש גרעין מבטון אליו מתחברת מערכת ההקשחה מפלדה שבתחום היחידות המודולריות.

כדי לאפשר שילוב של יחידות מיצרנים שונים רצוי לדעת המחברים ליצור תיאום מודולרי המבוסס על העקרונות הבאים:

עובי קיר כפול 300 מ"מ, עובי תקרה-רצפה 450 מ"מ, עובי מכלול תקרה רצפה כשהיחידות נשענות על מבנה נושא נפרד 600 מ"מ, מידות אורך ורוחב בפנים (נטו) שהן כפולות של 600 מ"מ. מידות גובה נטו של 2.4 או 2.7 מ'.

Larsson et al. 2012

המאמר עוסק בנייה מודולרית עם יחידות מבוצעות ממוצרי עץ, ובעיקר מ-Cross Laminated Timber (CLT), שנועדה לבניינים בגובה של עד 8 קומות. התיזה העיקרית של המחברים היא שבנייה מחומר זה "ירוקה" יותר מבנייה מבטון או מפלדה. נקודה זו הוכחה כבר לפני כן. יחד עם זאת, ההסברים של המחברים לגבי התנהגות בזמן שריפה, שהיא המחסום העיקרי בפני יישום שיטות המבוססות על מבנה מ-CLT בבנייה גבוהה, שטחיים מאוד, ולוקחים בחשבון שרכיבי המבנה מתלקחים ומתפחמים בזמן שריפה. אין שום הבהרה לגבי עובי הרכיבים הנדרש על מנת להמשיך ולשאת את העומסים הקיימים בבניין בגובה הנתון במקרה של שריפה ולמנוע כשל טוטלי של המבנה.

Lawson et al. 2012

לפי המחבר בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות שכיחה באירופה, בעיקר לבתי מלון, מעונות, מגורי חיילים, ובנייה ציבורית למגורים. היתרונות המודגשים כוללים: חזרתיות, מהירות התקנה באתר, איכות ודיוק, ופוטנציאלית – קלות הפירוק.

השיטות הטיפוסיות שמוזכרות במאמר הן:

- א. יחידות עם קירות נושאים מסוג LWSF כשהעומס לגובה המבנה מועבר מקיר לקיר.
- ב. יחידות עם עמודי פינה נושאים מסוג SHS המעבירים את העומס מקומה לקומה.

המערכת הנושאת והחיזוק לכוחות אופקיים מבוססים על:

עד 6 קומות: היחידות מוערמות זו על גבי זו וכוללות דיאפרגמות הקשחה בתחום הקירות של היחידות עצמן,

עד 10 קומות: היחידות נושאות עומסים אנכיים, וקבלת הכוחות האופקיים מבוססת על הקשיחות של פירי מעליות, חדרי מדרגות וגמלונים,

ומעל 10 קומות: המבנה מבוסס על גרעין בטון או פלדה והיחידות נושאות רק עומסים אנכיים, או שאינן נושאות כלל.

מצטט שני מאמרים Lawson 2005 ו Lawson 2007 הסוקרים את הטכנולוגיות השונות ותפוצתן. המחבר מציין שמידת רוחב פנימית היא עד 3.6 מ' וחיצונית עד 4.2 מ', ומידת אורך פנימית עד 9 מ'. מדגיש נקודות הקשורות לבעיות של חיבורי קונסטרוקציה והעברת כוחות:

- אקסצנטריות כתוצאה מהרכבה ומסבולות.
- אפקטים מסדר שני ביחידות עם עמודי פינה.
- מכניזם העברת הכוחות האופקיים לגרעין.
- יציבות תחת כוחות אקראיים דינמיים ומניעת התמוטטות בשרשרת.

המאמר מתייחס באופן השטחי ביותר להיבטים של עמידות אש והפרדה אקוסטית, ומציג מספר מקרי בוחן, כולל תמונות ותוכניות טיפוסיות.

מקרה בוחן מס. 1: בנייני פאראגון המערב לונדון – גרעין בטון (11-17 קומות):

מעונות סטודנטים. היחידות התלת ממדיות משלד פלדה עם עמודי פינה. מחצית המסדרון בתוך היחידה (רצפה ותקרה בולטות מהמסגרת). מפתח נקי מקיר נושא, במפגש בין יחידות, עד 6 מ'. סה"כ 827 יחידות בפרויקט, היוצרות 600 חדרי סטודנטים, 114 דירות סטודיו, 44 דירות 2 חדרים ו- 63 דירות 3 חדרים.

אין נתונים על הקמה וביצוע.

מקרה בוחן מס. 2: רחוב בונד, בריסטול.

מעונות סטודנטים מעל קומות מסחריות. 6 עד 10 קומות של בנייה עם יחידות תלת ממדיות מעל פודיום של 2 קומות תחתונות רגילות לצורך מסחר וחנייה. יציבות מתקבלת ע"י גרעינים עם חיזוקים אלכסוניים. חלק מהיחידות נמצאות בתחומי הגרעינים. כ- 400 יחידות תלת ממדיות בפרויקט. הגרעינים אינם מלבניים ומאפשרים תבנית אדריכלית סיבובית ולא מלבנית לכל הבניין. היחידות הגיעו עם הבידוד והאיטום למים, אך החיפוי החיצוני הדקורטיבי (Rain Screen) הותקן כשהבניין היה גמור.

אין נתונים על הקמה וביצוע.

מקרה בוחן מס. 3: פרויקט בולברמהפטון.

3 מבנים למגורים של 8 עד 25 קומות. סה"כ 824 יחידות תלת ממדיות. קיים פודיום של קומה אחת וגרעין בטון. היחידות מהוות 79% משטח הבנייה בפרויקט. שטח בנייה בכל הפרויקט 20730 מ"ר. משך הבנייה, מרגע עלייה על הקרקע עד מסירת הבניין, 59 שבועות. היחידות הגיעו עם הגימור הסופי, חלקן עם מערכת חיפוי של בידוד עם גימור דק, וחלקן עם קירות קלים מלוחות מרוכבים. משקל היחידות היה בטווח של 10 עד 25 טון. ההרכבה של היחידות נמשכה 32 שבועות ובוצעה ע"י צוות של 8 עובדים

ו-2 מנהלי עבודה. בממוצע 7 יחידות ליום, עם שיא של 15 יחידות ליום. התשומה הממוצעת הייתה 14.5 שעות אדם ליחידה. בסה"כ של הבניין הגמור, התשומה הייתה 16 שעות אדם למ"ר (כולל ייצור, שינוע, הרכבה, והבנייה של החלקים הקונבנציונליים), אשר לדברי המחבר מייצגת הגברת פרוין בשיעור של 80% לעומת פרויקט רגיל. מראים גם צמצום כולל של הפסולת בכ- 70% עם מחזור פסולת במפעל של כ- 40% לפחות, וצמצום תנועת משאיות אל האתר בכ- 70%. טוען להגברת הבטיחות בעבודה ולהפחתת תאונות עבודה בכ- 80%.

Vacarezza et al. 2012

המאמר סוקר את ההתפתחות של בנייה מודולרית תלת ממדית מתועשת מסוף המאה ה-19 ועד מלחמת העולם השנייה. מדובר בעיקר בבנייה של תאים יבילים עם שלד מעץ, שנישאו על משאיות לאתר הבנייה ושם שימשו כדירה בודדת, בדומה לקרוואן הנפוץ בארה"ב. כמו כן מוצגים מספר נסיונות לבצע בתים גדולים יותר, בני קומה אחת, המיוצרים ממספר יחידות תלת ממדיות המחוברות זו לזו.

Brown 2014

תרגיל של חברת אדריכלות (תוך התייחסות לטכנולוגיה של חברת DeLuxe Building Systems) לבחינה של השימוש ביחידות תלת ממדיות לפרויקט בווינגטון DC. רואים בקיצור משך הפרויקט, עקב הפעילות במפעל במקביל לעבודות באתר בראשית הפרויקט, כגורם העיקרי להוזלת הפרויקט. חוזרת ומדגישה את היתרונות שנמנו במאמרים האחרים. כחסרונות מוסיפה: פגיעה במידות נטו: בגלל הכפלת הקירות והתקרות השפעה על מידות פנים קטנות יותר, וכתוצאה עבור שטח ברוטו וגובה ברוטו זהים, שטח נטו קטן יותר וגובה נטו נמוך יחסית. חוסר תחרותיות כשכוח האדם לבנייה קונבנציונלית זול וזמין. חשש ממראה של קרוואנים מוערמים בערמה.



How modular construction is sometimes perceived

מציגה מספר פרויקטים בבנייה עם יחידות מודולריות תלת ממדיות כדי להוכיח יתרונות אדריכליים וכלכליים, החל מווילה של משפחה עשירה בבת-חסדה מרילנד, עד בנין בן 32 קומות בברוקלין ניו-יורק.

מציגה את האפשרויות האדריכליות בתמצית

החבאה מול גילוי התיעוש:

עטיפה והסתרה של היחידות לעומת הדגשתן המרחבית בחזית

מראה הבניין המתועש:

קונפיגורציות שונות בהעמדה לרוחב ולגובה

תנועה עדינה בחזיתות

פיתול ודינמיות של הבניין

דרמטיות ומורכבות

מציגה מספר שרטוטים של פרטי בניין בבנייה עם יחידות מפלדה, כולל מידות טיפוסיות.

לדבריה, החיפוי החיצוני יבוצע לרוב באתר הבנייה, וצריך להקפיד לתיאומו עם הפתחים (בעיקר מבחינת האיטום למים).

ההעדפה היא להימנע ממערכת מיזוג מרכזית ומשותפת לכל הבניין ולהתקין מערכות מיזוג אוויר נפרדות לכל דירה.

מערכות מים, חשמל וכד' לכל יחידה מגיעות עם היחידה והחיבור הוא באמצעות פירים נגישים מהמסדרון, כאשר גימור המסדרון נעשה באתר הבנייה כדי לאפשר את החיבורים ללא צורך בהריסה והתקנה מחדש.

Shin and Kim 2014

מציג מחקר תיאורטי הבוחן את האפשרות להחדיר לענף הבנייה בקוריאה את טכנולוגיית הבנייה המודולרית עם יחידות מילוי תלת ממדיות (In-fill). המוטיבציה לבחינה זו היא הצורך בבנייה מואצת של יחידות דיור קטנות עבור בודדים ומשפחות ללא ילדים.

המאמר מתמקד בשיטה קוריאנית, CHS – Cruse Housing System, המבוססת על יחידות קלות תלת ממדיות ברוב של 2.7 מ', אורך 6.6 מ' וגובה 3.0 מ', שאינן נושאות, המושחלות לתוך מבנה שלד של עמודים ותקרות. היחידות התלת ממדיות נבנות מרכיבי פלדה מעוצבים בקר ומוגמרות כ-85% במפעל, כולל חיפויים פנימיים וחיפויים, מערכת איטום למים, קבועות סניטריות וריהוט מקובע כמו ארונות מטבח וכד'. המבנה באתר כולל מערכת של עמודי פלדה ותקרות בטון, כאשר היחידות התלת ממדיות מושחלות פנימה דרך המעטפת החיצונית. העבודות באתר כוללות חיבורים קונסטרוקטיביים אל השלד, חיבור מערכות השירות של היחידה למערכת הציבורית, והשלמות של חיפויים בחלקים הציבוריים. היתרון העיקרי שהמחברים מוצאים בטכנולוגיה זו, לעומת הבנייה מיחידות נושאות המוערמות זו על גבי זו, היא המשקל המופחת של היחידה שאינה נושאת עומס, אשר מקל בשינוע ובהרכבה, והתאמתה לבניית בניינים גבוהים במיוחד למעשה ללא הגבלת גובה.

Mills et al. 2015

המועצה האמריקאית לבנייה גבוהה הכינה מסמך שעוסק באתגרים הטכנולוגיים העיקריים של שימוש בבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל. המסמך מתייחס ליתרונות וחסרונות, כולל מידע על פרויקטים לדוגמה, וכן תיאור כללי של הטכנולוגיה כלהלן:

השלד השכיח של היחידות המודולריות הוא מפלדה קלה. לבנייה עד כ- 4 קומות מתאימות בדרך כלל יחידות עם שלד המבוסס על קירות נושאים מפח מעוצב בקר. לבנייה גבוהה יותר עד כ- 13 קומות מוסיפים עמודי פינה מפרופילים מעורגלים בחם מסוג RHS. מעל לגובה זה המסגרת כולה תבוצע מפרופילים מעורגלים בחם. במקרים בודדים מלאו את פרופילי הפינה בבטון באתר הבנייה על מנת לשפר את כושר הנשיאה.

שימוש בעץ לשלד היחידות נפוץ רק עבור בנייה נמוכה.

שימוש בבטון לשלד היחידות מעורר קושי בהרכבה ולכן אינו מקובל.

לביצוע הרצפה קיימות מספר חלופות. הקלה ביותר לתיעוש מבוססת על לוחות לביד, גבס או צמנט המותקנים על גבי קורות הפלדה. הניסיון מראה שרצפות כאלה אינן אהודות על המשתמשים בגלל התחושה החלולה שהן מקנות. מסיבה זו נפוצה יותר רצפה המבוססת על יציקת מידה על גבי סיפון פלדה מפח מעוצב בקר. מסת הרצפה הטיפוסית מסוג זה היא 120-140 ק"ג למ"ר.

עמידות בעומסים אופקיים מכוחות הרוח מושגת עד כ- 10 קומות באמצעות פעולת המסגרת של היחידות. מעל לגובה זה נחוץ גרעין מייצב מבטון או מפלדה, כאשר העברת הכוחות מהיחידות לגרעין מבוססת על מערכות הקשחה (אלכסונים וכד') במישורי הקירות, הרצפה והתקרה. נהוג לכלול בתחום הגרעין את מהלכי המדרגות, המעליות ופירי שירות.

להבטחת גמר פנימי מושלם במפעל, החיבורים בין היחידות מבוצעים בדרך כלל בצד החיצוני של היחידה. המחבר הפשוט ביותר הוא בהברגה באמצעות פלטות מפלדה מעורגלת בחם. בגלל שביצועו מחייב גישה נוחה וטולרנסים קטנים מאוד בביצוע היחידות מתואמים עם הטולרנסים של החורים בפלטות החיבור, הוא פחות מתאים לבנייה גבוהה. למטרה זו פותחו מחברים ננעלים, המבוססים על התחברות בנעיצה ולחיצה, בדומה למחברי "לגו".

למערכת הגמר של החזיתות הסופיות של הבניין קיימות שתי אופציות עיקריות: כל יחידה מגיעה מן המפעל עם הגימור הסופי ובאתר מבוצע רק איטום בין היחידות, או שהיחידות מגיעות ללא גמר, ומערכת הגמר מבוצעת בשלמותה באתר, כשאלמנטים תלויים מהקונסטרוקציה של היחידות במחברים מוכנים מראש.

Park and Ock 2016

מתאר בקצרה את הניסיון הקוריאני בהחדרת מערכות מתועשות עם יחידות תלת ממדיות על מנת להתגבר על מצוקת החוסר בכוח אדם לעבודה בשיטות קונבנציונליות. מבחין בין בנייה ללא שלד נפרד

כאשר היחידות המודולריות יוצרות את השלד (עד כ- 8 קומות) , ובנייה גבוהה יותר המורכבת מבנייה עם גרעין נושא, בנייה עם פודיום משולב עם גרעין, ושיטת השלד עם מילוי.

מבחין בין יחידות שאינן נושאות (צירוף של פאות מחוברות ביניהן ללא שלד) לבין יחידות בעלות כושר נשיאה (מבוססות על קירות נושאים, או לחלופין על מסגרת נושאת). הטיפוס הראשון הוא זה שמיועד לשיטת המגרות.

מתאר בקצרה את כל השיטות. ורק לאחר מכן מתמקד בפירוט רב בשיטת המגרות.

בשיטה זו השלד נבנה בכל שיטה מקובלת שמבטיחה את יציבותו המרחבית המלאה, כולל כנגד כוחות אופקיים, רעידת אדמה, רוח וכד'. היחידות התלת ממדיות הן מילואות בלבד, ואין להן שום תפקיד נושא. מבחינה זו נמנע החשש מהשפעות שליליות של אקסצנטריות בלתי נשלטת בהעברת הכוחות.

מזכיר מאמר אחר (Lee and Ock) שמתאר פיסית את שיטות הבנייה.

בהמשך מתאר מקרה בוחן של בניין מגורים בן 12 קומות בקוריאה בו בוצעו מעקב ומדידה של תשומות. 4 הקומות הראשונות נועדו למסחר ולא כללו יחידות תלת ממדיות. ביתר הקומות הושחלו 11 יחידות כאלה לכל קומה.

כל יחידה הורכבה מלוחות קיר ברוחב 30 או 60 ס"מ ועובי לפי הצורך בשיטת הקליק. היחידות הובאו לאתר והורכבו ישירות בפריקה מהמשאית. החיבור אל הקונסטרוקציה היה בהברגה.

מכיוון שזה היה הבניין הראשון מסוג זה בקוריאה, קצב ההרכבה השתנה מקומה לקומה. בקומת ההרכבה הראשונה תהליך השחלת והרכבת היחידות ארך 4 ימים, בקומות האחרונות מלאכה זו נמשכה יומיים בלבד.

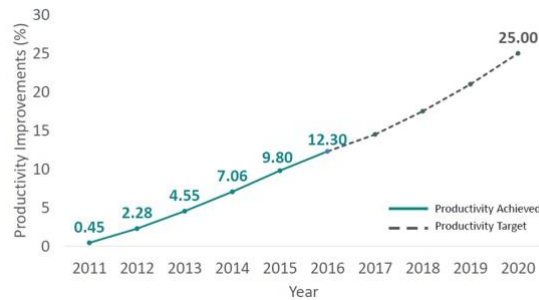
Building and Construction Authority (BCA), Singapore

<https://www.bca.gov.sg/BuildableDesign/ppvc.html>

<https://www.hdb.gov.sg/cs/infoweb/press-release/new-initiatives-to-boost-construction-productivity>

מאז הפעלת הפרויקט להגדלת הפריץ בענף הבנייה בסינגפור הוחדרה בנייה מתועשת רגילה (בעיקר בנייה טרומית המבוססת על פנלים דו ממדיים מבטון) בכ- 70% של פרויקטי הבנייה למגורים. רמת הפריץ עלתה מאז שנת 2010 עד 2016 בכ- 12.3% לכמחצית מהרמה המתוכננת, ולכן הוחלט לפעול באורח פרואקטיבי ליישום בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות.

הגרף המצוטט מבטא את התכנון המיועד עד לשנת 2019.



רשות הבנייה של סינגפור מכנה את הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות לחלוטין במפעל PPVC (Prefabricated Prefinished Volumetric Construction).

מאז ראשית נובמבר 2014, ממשלת סינגפור חייבה שימוש בבנייה מסוג זה בחלק נבחר של מתחמי הבנייה ציבורית למגורים. החל משנת 2019 לפחות 35% של כל הבנייה המנוהלת על ידי HDB (Housing and Developing Board) יחויב להתבסס על PPVC, כאשר 100% של חדרי הרחצה יחויב להיות מיחידות כאלה (PBUs – Prefabricated Bathroom Units).

מערכת התקנות מכתיבה את הדרישות החלות על התכנון והביצוע של היחידות על מנת להבטיח רמת תיעוש גבוהה במיוחד. על מנת לבנות בסינגפור בשיטת ה-PPVC, כל יצרן חייב לקבל אישור לשיטת הבנייה שלו ממערכת הבחינה והאישור של שיטות בנייה חדשות בסינגפור (BIP – Building Innovation Panel PPVC Manufacturing). על מנת לבנות במתחמים בהם בנייה מסוג זה היא חובה, היצרן צריך גם לקבל הכרה (אקרדיטציה) על פי מערכת הכללים של PPVC MAS (Accreditation Scheme). בתום הבדיקות וההכרה, השיטה נרשמת באתר האינטרנט של רשות הבנייה וניתן לבנות בה פרויקטים באתרי בנייה בהם מחויבת בנייה מודולרית כנ"ל.

כדי להקל על המתכננים, היצרנים והבונים בשיטות אלה, רשות הבנייה של סינגפור הכינה מדריך טכני לאנשי המקצוע (ראה סעיף א-15).

Hwang et al. 2018

מאמר זה כולל תחילה סקר ספרות תמציתי של עשרות מאמרים שנכתבו על בנייה מתועשת באמצעות יחידות תלת ממדיות המיוצרות במפעל ומורכבות באתר, ולאחר מכן מתמקד בהיבט של חסרונות וחסמים ליישום בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל, המכונה בסינגפור PPVC. לסיכום סקירת הספרות של היבט זה הוכנו ע"י המחברים שתי טבלאות:

הטבלה הראשונה, המצוטטת מהמאמר, מציגה את 18 החסמים שהוסקו מהספרות והמקורות המעלים אותם:

Table 1
Constraints on using PPVC.

Code	Constraints	References
C1	Decreased flexibility for design changes later	Azhar et al. (2013); De La Torre (1994); Jaillon and Poon (2010); Kamali and Hewage (2016); Lu (2007); Mao et al. (2015); Rahman (2013); Tam et al. (2007)
C2	Unsupportive decision made by designers	Azhar et al. (2013)
C3	Limitations to design due to transportation restrictions (e.g. modules' size)	Mao et al. (2015); Rahman (2013)
C4	Restricted site layout (e.g. lack of storage space for PPVC modules/lack of space to unload and move the modules)	Azhar et al. (2013); Jaillon and Poon (2010); Kamali and Hewage (2016); Mao et al. (2015); Tam et al. (2007)
C5	Lack of PPVC experiences in term of design	Jaillon and Poon (2010); Mao et al. (2015); Rahman (2013); Tam et al. (2007)
C6	Lack of PPVC experiences in term of installation	Chiang et al. (2006); Jaillon and Poon (2010); Mao et al. (2015); Rahman (2013); Tam et al. (2007)
C7	Need for additional protection materials for PPVC modules	De La Torre (1994)
C8	Increased transportation and logistics considerations	Haas and Fagerlund (2002); Kamali and Hewage (2016); Mao et al. (2015); McGraw Hill (2011)
C9	Transportation restrictions due to rules and regulations	Chiang et al. (2006); Haas and Song (2002); Jaillon and Poon (2010); Kamali and Hewage (2016); Mao et al. (2015)
C10	Lack of awareness of PPVC's benefits among owners/developers	Azhar et al. (2013); Mao et al. (2015)
C11	Increased organizational requirements (e.g. changing roles of project participants/increased complexity of procurement and contracting issues)	Haas and Fagerlund (2002); Mao et al. (2015)
C12	Requirement for early commitment	Azhar et al. (2013); Blismas et al. (2005); Jaillon and Poon (2010); McGraw Hill (2011); Rahman (2013)
C13	The need for additional project planning and design efforts	Construction Industry Institute (1992); De La Torre (1994); Haas and Song (2002); Haas and Fagerlund (2002); Lapp and Gelay (1997); Lu (2007)
C14	Extensive coordination required prior to and during construction	Arashpour et al. (2016); De La Torre (1994); Haas and Song (2002); Haas and Fagerlund (2002); Kamali and Hewage (2016); Lu (2007)
C15	Higher initial cost to conventional construction method	(Gibb and Isack, 2003); Jaillon and Poon (2010); Kamali and Hewage (2016); Lapp and Gelay (1997); Mao et al. (2015); (Pan et al., 2007, 2008); Rahman (2013)
C16	Higher construction costs to the conventional construction method	De La Torre (1994); Jaillon and Poon (2010); Mao et al. (2015); Rahman (2013); Tam et al. (2007)
C17	Require more communication among all stakeholders	Haas and Fagerlund (2002); Kamali and Hewage (2016)
C18	Complex code compliance and inspection process	Mao et al. (2015); Rahman (2013)

הטבלה השנייה מציגה את 9 האמצעים שהוצעו בספרות להתמודדות עם חסמים אלה:

Table 2
Mitigation strategies for the constraints on using PPVC.

Code	Mitigation strategy	References	Targeted constraint
MS1	Encouraging close collaborations between project stakeholders during early phase of project	Goh and Loosemore (2017); Said (2015, 2016)	C1, C2, and C3
MS2	Apply Temporary Occupation License (TOL) to set up temporary worksite in the vicinity of the construction site to overcome the restricted site layout issue	Shi and Sun (2001)	C4
MS3	Use of Just-in-Time delivery	Kim et al. (2013); Low and Chuan (2001); Oral et al. (2003); Wu and Low (2012)	C4
MS4	Offering training courses for project team and workers to enhance their knowledge and skills	Arashpour et al. (2017); Hanna et al. (2017)	C5, C6, and C7
MS5	Fabricate and assemble the module components as close as possible to the construction site to reduce transportation effort	Khalili and Chua (2013); Mao et al. (2016)	C8 and C9
MS6	Use of Information Technologies (e.g. electronic file transfer) to overcome the extra requirement of planning, coordination and communication	Kim et al. (2016); Ramaji and Memari (2016)	C10 and C11
MS7	Conduct feasibility studies for PPVC method	Tam et al. (2007)	C12, C13, C14, C15, C16, C17, and C18
MS8	Develop systems/computer programs to perform detailed economic analyses for both PPVC and conventional construction methods	Wang et al. (2016)	C12, C13, C14, C15, C16, C17, and C18
MS9	Use of BIM to improve coordination and facilitate communication among project stakeholders	Kim et al. (2016); Zhang et al. (2016)	C12, C13, C14, C15, C16, C17, and C18

על בסיס סקר הספרות, בצעו החוקרים ראיונות ראשוניים עם שלושה אנשי מקצוע מנוסים מסינגפור, החברים גם בוועדת החדשנות בבנייה של סינגפור, ויחד איתם עדנו את הנוסח של הפריטים בשתי הרשימות. בהמשך הוכן שאלון שהופץ ל- 100 חברות סינגפוריות בעלות ניסיון בתחום הבנייה המתועשת. השאלון עסק בדירוג 18 החסמים ו- 9 אמצעי ההתמודדות בסולם של 5 דרגות. תשובות התקבלו מ- 41 חברות. בנוסף לשאלון בוצעה חקירה שיטתית של מקרה בוחן אחד (הפרויקט הגדול הראשון שנבנה בסינגפור בטכנולוגיה זו שכלל מעונות באוניברסיטה של Nanyang) באמצעות איש מקצוע שעקב אחרי כל התהליכים לאורך המימוש של הפרויקט על מנת לבחון מה הם הקשיים שהתגלו בפועל בפרויקט.

ניתוח התשובות לשאלונים הראה שסדר החשיבות של החסמים הוא כמוצג בטבלה המצוטטת:

Table 4
Assessments and statistical test results of constraints.

Code	Constraint	Mean Rank	Shapiro-Wilk test (p-value)	Kruskal-Wallis test (p-value)
C14	Extensive coordination required prior to and during construction	4.37	1 0.000*	0.344
C13	Need for additional project planning and design efforts	4.27	2 0.000*	0.810
C8	Increased transportation and logistics considerations	4.10	3 0.000*	0.153
C12	Requirement for early commitment	4.00	4 0.000*	0.162
C15	Higher initial cost than conventional construction method	3.95	5 0.000*	0.054
C3	Limitations to Design due to transportation restrictions (e.g. modules' size)	3.94	6 0.000*	0.677
C1	Decreased flexibility for design changes later	3.93	7 0.000*	0.403
C9	Transportation restrictions due to rules and regulations	3.80	8 0.000*	0.381
C4	Restricted site layout (e.g. lack of storage space for PPVC modules/lack of space to unload and move the modules)	3.78	9 0.000*	0.499
C16	Higher construction costs to the conventional construction method	3.71	10 0.000*	0.424
C17	Require more communication among all stakeholders	3.71	10 0.000*	0.242
C18	Complex code compliance and inspection process	3.54	12 0.000*	0.405
C10	Lack of awareness of PPVC's benefits among owners/developers	3.51	13 0.001*	0.263
C5	Lack of PPVC experiences in term of design	3.49	14 0.000*	0.162
C6	Lack of PPVC experiences in term of installation	3.44	15 0.001*	0.829
C2	Unsupportive decision made by designers	3.44	15 0.002*	0.973
C7	Need for additional protection materials for PPVC modules	3.17	18 0.005*	0.026**
C11	Increased organizational requirements (e.g. changing roles of project participants/increased complexity of procurement and contracting issues)	3.41	17 0.000*	0.203

Note: * The Shapiro-Wilk test was significant at the significance level of 0.05, suggesting the data were not normally distributed.

**The Kruskal-Wallis test was significant at the significance level of 0.05, suggesting statistical difference among respondents from different institutions.

סדר החשיבות של אמצעי ההתמודדות המתאימים הוא כמוצג בטבלה הבאה:

Table 6
Assessments and statistical test results of mitigation strategies.

Code	Mitigation strategy	Mean Rank	Shapiro-Wilk test (p-value)	Kruskal-Wallis test (p-value)
MS1	Encouraging close collaborations between project stakeholders during early phase of project	4.17	1 0.000*	0.046**
MS9	Use of BIM to improve coordination and facilitate communication among project stakeholders	4.07	2 0.000*	0.437
MS4	Offering training courses for project team and workers to enhance their knowledge and skills	4.02	3 0.000*	0.544
MS3	Use of Just-in-Time delivery	3.68	4 0.000*	0.684
MS5	Fabricate and assemble the module components as close as possible to the construction site to reduce transportation effort	3.63	5 0.000*	0.310
MS6	Use of Information Technologies (e.g. electronic file transfer) to overcome the extra requirement of planning, coordination and communication	3.63	6 0.000*	0.839
MS8	Develop systems/computer programs to perform detailed economic analyses for both PPVC and conventional construction methods	3.63	7 0.000*	0.673
MS7	Conduct feasibility studies for PPVC method	3.56	8 0.000*	0.316
MS2	Apply Temporary Occupation License (TOL) to set up temporary worksite in the vicinity of the construction site to overcome the restricted site layout issue	3.46	9 0.001*	0.425

Note: * The Shapiro-Wilk test was significant at the significance level of 0.05, suggesting the data were not normally distributed.

**The Kruskal-Wallis test was significant at the significance level of 0.05, suggesting statistical difference among respondents from different institutions.

החוקרים מדגישים את חמשת החסמים העליונים בטבלה 5 כגורמים העיקריים שדורשים שימת לב, ושלושת האמצעים העליונים בטבלה 6 כמתאימים ביותר להתמודדות עם החסמים. מן הראוי להדגיש ששני האמצעים שדורגו ראשונים אכן מאפשרים התמודדות עם שני החסמים העליונים, אך הדירוג במיקום השלישי הוא מפתיע כי אמצעי זה, MS4, מתאים בעיקר לחסמים C17, C5, C6 שמוקמו בדירוג נמוך יחסית. החוקרים לא מתייחסים לחוסר הקונסיסטנטיות הזו ומדגישים בכל זאת את החשיבות של פיתוח מערכות הכשרה, ומציינים שזה אכן כבר קורה בסינגפור.

לבסוף המאמר מפרט את מקרה הבוחן של הפרויקט שכלל 6 בניינים בני 13 קומות כל אחד ובנייתו הסתיימה תוך 19 חודשים. פרויקט זה כלל גם מרכז סטודנטיאלי עם מסעדות, אולם ספורט גינת גג, אזורי ברבקיו, וכד', והורכבו בו 1213 יחידות תלת ממדיות במשך של כ- 200 ימים. בגלל העדר יכולת ייצור מספיקה בסינגפור באותה עת, היחידות לבניית הבניינים יוצרו בארבעה מפעלים (בסינגפור, מלזיה, סין וטאיוואן). לפני התחלת ביצוע למשלוח לאתר, בוצעו בכל מפעל יחידות הדגמה. רק לאחר אישור הדגם החל הייצור השוטף במפעל. כל היחידות הובאו תחילה לאתר מיוחד בסינגפור בו בוצעה בקרת איכות של היחידות להבטחת התאמתן לדרישות. מכאן הן שונעו לאתר הפרויקט. בכל יום שונעו

6 יחידות בהתאם לקצב ההרכבה באתר. הקשיים העיקריים שהמעקב הראה כללו: הגדלת עלות שנבעה מבניית יחידות בחו"ל ושינוען לסינגפור, צורך בהשקעת זמן רבה במיוחד בתכנון המוקדם ובתיאום בין הגורמים השונים כבר מראשית הפרויקט, והצורך לתאם את תנועת הרכבים הכבדים שלושה ימים מראש לכל נסיעה בגלל הדרישות הרגולטוריות בסינגפור.

World Shipping Organization 2019,

<http://www.worldshipping.org/about-the-industry/containers/dry-cargo-containers>

בבניית בניינים ממכולות משתמשים במכולות המיועדות להובלה ימית שמסיבות שונות כבר אינן בשימוש למטרתן המקורית. מכולות אלה יכולות לעבור שינויים קלים על מנת להתאימן לבנייה המודולרית, אך מידותיהן החיצוניות והפנימיות הבסיסיות אינן ניתנו לשינוי.

המועצה העולמית להובלה ימית מציינת שמידות המכולות הן סטנדרטיות וזרות בכל העולם משום שהן נועדו לאפשר התאמה מלאה לעירום המכולות על אניות ורכבות, ולכן גם עוגנו בתקינה הבינלאומית (ISO 6346). המידות הנתונות בטבלה הן המידות הסטנדרטיות המקובלות על כל היצרנים של מכולות בעולם.

SIZE	DOOR OPENINGS* M FEET/INCHES		INTERNAL DIMENSIONS* M FEET/INCHES			VOLUME* M ³ CUBIC FEET
	Width	Height	Length	Width	Height	Capacity
20 standard 20' X 8' X 8'6"	2.340 7' 8"	2.274 7' 6"	5.896 19' 4"	2.350 7' 8"	2.393 7' 10"	33 1,170
40 standard 40' X 8' X 8'6"	2.340 7' 8"	2.274 7' 6"	12.032 39' 6"	2.350 7' 8"	2.392 7' 10"	67 2,390
40 High 40' X 8' X 9'6"	2.640 7' 8"	2.577 8' 6"	12.032 39' 6"	2.350 7' 8"	2.697 8' 10"	76 2,700
45 High 45' X 8' X 9'6"	2.340 7' 8"	2.584 8' 5"	13.556 44' 6"	2.347 7' 8"	2.696 8' 10"	86 3,055

* General description – dimensions vary by specific units.

נתונים אלה מראים:

א. הגובה הפנימי של המכולות הסטנדרטיות הוא פחות מ- 2.4 מ' (לפני התקנת בידוד, חיפוי תקרה ומערכת ריצוף) ולכן הוא נמוך מדי לבניית בניינים. יחד עם זאת, למכולות הגבוהות ("High") גובה פנימי קרוב ל- 2.7 מ' והן מתאימות בהחלט.

ב. הרחב הפנימי של כל סוגי המכולות (לפני הוספת חיפויי פנים) הוא כ- 2.35 מ', מידה שאינה מתאימה לחדרי מגורים רגילים. יחד עם זאת קיימות מכולות "צד פתוח", המשמשות בדרך כלל לטעינת מטענים גדולים שלא ניתן להחדירם דרך הדלת. צירוף של שתי מכולות מסוג זה (או יותר), בגיאומטריה פשוטה או מורכבת, יכול לשמש לבניית חללים מורכבים ורחבים.



א-2.1. מראי מקום:

- Brown, A.R., 2014, "Fabulous Pre-fab, Applying Modular Construction to Multifamily Residential Projects in Washington, DC". Hickok Cole Architects, Abigail R. Brown. Building and Construction Authority (BCA), Singapore, 2019, <https://www.bca.gov.sg/BuildableDesign/ppvc.html>, <https://www.hdb.gov.sg/cs/infoweb/press-release/new-initiatives-to-boost-construction-productivity> .
- Gorgolewski, M.T., Grubb, P.J., Lawson, R.M., 2003, "Modular Construction using Light Steel Framing, Design of Residential Buildings". SCI Publications, P302, The Steel Construction Institute, Berkshire, UK.
- Hwang, B.G., Shan, M., Looi, K.Y., 2018, "Key constraints and mitigation strategies for prefabricated prefinished volumetric construction". Journal of Cleaner Production 183 (2018) 183-193.
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., Pedreschi, R., Grubb, P. J., Popo Ola, S.O., 2005, "Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction". The Structural Engineer – 99.

- Lawson, R.M., Ogden, R.G., 2008, "'Hybrid' light steel panel and modular systems". *Thin-Walled Structures* 46 (2008) 720– 730.
- Larsson, M., Kaiser, A., Girhammar, U.A., 2012, "MULTI-STOREY MODULAR MANOEUVRES – Innovative architectural stacking methodology based on three Swedish timber building systems". *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering Auckland New Zealand* 15 - 19 July 2012. P63-72.
- Lawson, R.M., Ogden, R.G., Bergin, R., 2012, "Application of Modular Construction in High-Rise Buildings". *J. Archit. Eng.*, 2012, 18(2): 148-154.
- Mills, S., Grove, D., Egan, M., 2015, "Breaking the Pre-fabricated Ceiling: Challenging the Limits for Modular High-Rise". *CTBUH – Council on Tall Buildings and Urban Habitat. New York Conference.*
- Park, H.K., Ock, J.H., 2016, "Unit Modular In-Fill Construction Method for High-Rise Buildings". *KSCE Journal of Civil Engineering* (2016) 20(4):1201-1210.
- Shin, J., Kim, G.H., 2014, "Fabrication Processes of Residential Building Adopted Cruise Housing System". *Applied Mechanics and Materials* Vols. 638-640 (2014) pp 1606-1609.
- Vacarezza, O.G., Aguirregabiria, L.B., Perez, L.J.M., Vergara, E.C., 2012, "Technical evolution of 3D Modular Construction from the 19th Century to World War II". *2nd International Conference on Construction and Building Research* Escuela Técnica de Ingeniería de Edificación Universitat Politècnica de València Valencia, Spain, 14-16 November 2012
- World Shipping Organization, 2019, <http://www.worldshipping.org/about-the-industry/containers/dry-cargo-containers>

א-3. היבטים אדריכליים

א-3.1 הקדמה

סקר הספרות המציג את ההיבטים האדריכליים מחולק לשלושה חלקים. החלק הראשון כולל סקירה היסטורית קצרה שמסגרת את התפתחות התחום בראייה היסטורית. החלק השני מתמקד בסקירה של ספרים מקצועיים שנכתבו החל מהעשור האחרון של המאה העשרים על מבנים מתועשים באדריכלות תוך התמקדות בבנייה מודולרית תלת ממדית. החלק השלישי מתמקד בסקירה של מאמרים אקדמיים וכיווני מחקר מדעיים באדריכלות בתחום.

א-3.2 רקע היסטורי

בנייה מתועשת מוזכרת כבר במאה ה-17 עם המשלוח של חלקי מבני עץ מתועשים לבניית מבנה מגורים לדייגים בקייפ אן בשנת 1624. התפתחות התיעוש בתחילת המאה העשרים הביאה להקמתן של החברות הראשונות (חברת אלדין וחברת סירס, 1906, 1908) שעסקו בבנייה מתועשת ליצור "קיטים" של מבנים או מבנים מחלקים דו ממדיים ארוזים. מאז הקמת החברות קיימת התפתחות עקבית בתחום הבנייה המתועשת המתבססת על רכיבים דו ממדיים המתועדת במספר רב של ספרים וביניהם:

(Albern 1997, Arieff and Burkhart 2002, Aitchison 2018).

בנייה מתועשת המבוססת על יחידות תלת ממדיות המיוצרות במפעל ומובלות לאתר מוזכרת בספרות החל מהמחצית הראשונה של המאה העשרים. המבנים הראשונים שיוצרו נועדו לשמש תחליף זול למגורים. אחת החברות הראשונות שעסקו בבנייה מסוג זה הייתה חברת American Houses Inc ששיוקה את ה-Motohouse. המבנה נבנה בניו ג'רסי ארה"ב ושווק בכל ארה"ב. הוא הורכב מקונסטרוקציית פלדה וכלל את כל המערכות. בפרסומת למבנים נאמר שהמבנה נמסר "גמור עם אוכל במקרר". תמונה 1 מציגה דוגמא למבנה שנבנה בשנת 1933 עבור WINSLOW AMES בניו לונדון קונטיקט, ומהווה אחד משני המבנים ששרדו מסוג בנייה זה.



בנייה של מבנים מתועשים קיבלה תנופה לאחר המשבר הכלכלי של שנת 1929 ולאחר מלחמת העולם השנייה עת נדרשה בכל העולם בנייה מהירה בהיקפים גדולים. הבנייה מסוג זה התחלקה לשלושה סוגים עיקריים: מבנים יבילים (מבנים אותם ניתן להעביר בכל רגע על גבי משאית למיקום חדש): קרוונים או מבנים על גלגלים (מבנים שיכלו לנוע באופן עצמאי או ע"י חיבור לרכב) ומבני מגורים (מבנים שנבנו במפעלים והוקמו כמבנה קבע). המחקר הנוכחי מתמקד בסוג האחרון ובעיקר במבנים רבי קומות למגורים.

כאמור, לאחר מלחמת השנייה הייתה תנופת פיתוח של מבנים מתועשים בכלל ושל מבנים המבוססים על אלמנטים תלת ממדיים בפרט. מספר חברות ניסו לעשות שימוש בשאריות מתעשיית המטוסים במלחמה והציעו מבנה מתכת. לדוגמא, חברת לוסטרון (Lustron) יצרה בית ממתכת בשנת 1948 אך לא צלחה במכירות. בקמינסטר פולר פיתח באותה תקופה (1949) את מבנה הכיפה הגאודזית, אך לא זכה להצלחה בניסיון לממש אותו כמבנה מגורים.

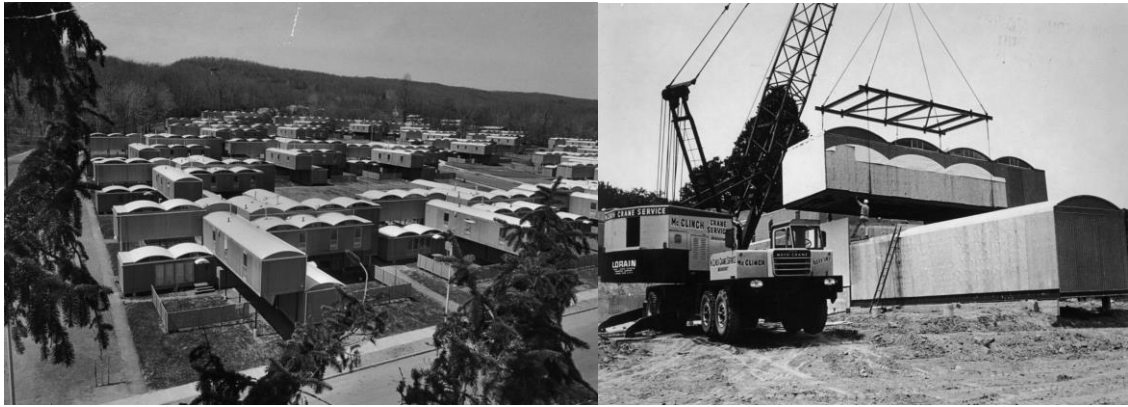
מספר חברות בארה"ב, כדוגמת חברת Levit וחברת Eichler, הצליחו לממש בנייה מתועשת בהיקפים גדולים. בנייה זו מבוססת בעיקר על קירות דו ממדיים אך היו בה גם אלמנטים תלת ממדיים. בשנות השישים החלו לממש מבני מגורים גדולים יותר המבוססים על יחידות תלת ממדיות. הבולטים שבהם היו מבנה ההביטט שתוכנן ע"י משה ספדי תוך התבססות על יחידות מבטון, כמוצג בתמונה המצוטטת מצילום של ג'רי ספירמן ב-

<https://www.dezeen.com/2014/09/11/brutalist-buildings-habitat-67-montreal-moshe-safdie/>



158 דירות נבנו מ 354 יחידות מודולריות מקופסאות במידות של 2.28*11.73*3.20 מטר. המבנה נבנה תוך חריגה של כמעט פי שניים מהתקציב. כלקח מתהליך בניית הפרויקט אמר ספדי "אף אחד לא יוכל לבנות בית מסוג זה עד שהתהליך כולו יעשה תחת חברה אחת ואיגוד מקצועי אחד" (תרגום חופשי). אדריכל נוסף שניסה לפתח בהצלחה מבנים המבוססים על בנייה מתועשת באותה תקופה היה פול רודולף. למרות מספר פרויקטים מוצלחים שנבנו, כדוגמת Oriental Masonic Gardens בניו

הייבן קונטיקט ב-1968 (המוצג בתמונה מ-
http://mjobrien.com/Papers/OBrien_CHS_Boston_Repeating_Success.pdf), בחלק גדול
 מהפרויקטים נאלץ להסתפק בבנייה קונבנציונלית בגלל בעיות תקציב וחוקי בנייה.



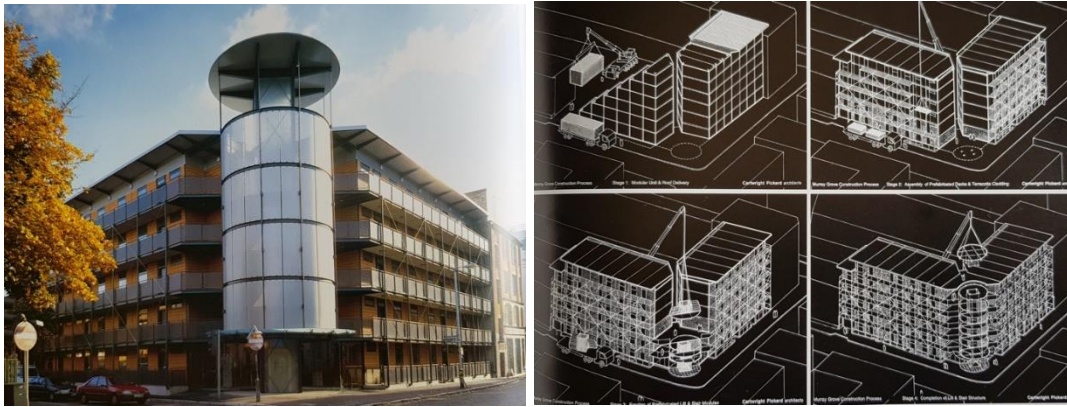
שנות השישים הביאו עימן גם את המטבוליזם היפני. בדומה לספדי ולרודולף פרויקטים אלה נבנו מיחידות מודולריות, אך היו שונים בכך שנתמכו בבסיס/לב מבטון. הפרויקט המפורסם ביותר מתוך הפרויקטים של הסגנון בסוף שנות השישים הוא מגדל הקפסולות של קישו קורקווה (מוצג בתמונה המצוטטת מ-Jordy Meow). הפרויקט תוכנן כמלון לבליינים שאיחרו את המועד לחזור הביתה. ההשקעה בבסיס של המגדל הייתה גבוהה מאוד ביחס למבנה דומה בבנייה קונבנציונלית. למרות שניתן היה לחבר יחידות נוספות או לשנות יחידות לא בוצעו בבניין שינויים לאורך השנים (Smith 2010).



הרבע האחרון במאה העשרים מאופיין בהתקדמות גדולה בתכנון וייצור קונסטרוקציות מתועשות למבנים כדוגמת מוזיאון הפומפידו בפריס בתכנון משותף של המשרדים של אדריכל לורד ריצ'רד רוג'רס הבריטי והמשרד של אדריכל רנזו פיאנו האיטלקי או בנק לויס בלונדון בתכנון המשרד של

אדריכל סר נורמן פוסטר הבריטי. אולם, מבחינת התקדמות בתיעוש יחידות מבניות תלת ממדיות לא היו פריצות דרך אלא התפתחות טכנולוגית עקבית. ברם, בתקופה זו, בניגוד לתעשיות רבות אחרות הפרודוקטיביות של תעשיית הבנייה הייתה בנסיגה של כמעט 20% (Smith 2010 עמוד 79).

דוגמא מייצגת למבנה מגורים הבנוי מיחידות תלת ממדיות מסוף המאה העשרים תחילת המאה העשרים ואחת הוא מבנה Murray Grove Apartments בתכנון Cartwright Pickard Architects. מבנה זה, שקיבל את פרס ריבה של אגודת האדריכלים בבריטניה, כולל שבעים וארבע יחידות מגורים של חדר אחד המבוססים על יחידה 3.2×8 מטרים ממתכת. מעבר ליחידות המגורים נבנה גם פיר המעלית והמדרגות מיחידות מודולריות (מוצג בתמונה המצוטטת מ- Arieff and Burkhart 2002).



ההתפתחות המואצת של התחום באדריכלות החלה בשנות ה-90 של המאה עשרים בעקבות שינויים טכנולוגיים בתחומי העיצוב והייצור האדריכלי. השינוי המשמעותי בתחום העיצוב מתייחס למעבר לשימוש בתוכנות פרמטריות המבוססות על שיטת BIM או שימוש באובייקטים חכמים (בניגוד לשיטה המסורתית של שימוש בקווים). המעבר ל-BIM (ראה תת-פרק א-10) מאפשר שימוש קל יותר בתכנון מודולרי של יחידות תלת ממדיות, תומך בתכנון פשוט למדי של יחידות שאינן חזרתיות (mass customization) וחוסך זמן תכנון וביצוע רב תוך חיסכון בעלויות. השינוי השני המשמעותי קשור ליכולת התקשורת בין התכנון למכונות הייצור שמשנה באופן מהפכני את הקשר בין התכנון האדריכלי לייצור ומחזק למעשה את האפשרות לייצור מתועש.

א-3.3 ספרים מקצועיים חשובים על בנייה מתועשת ובנייה מודולרית

Albern 1997

ספר זה מציג בצורה מפורטת את כל הדרוש בארה"ב על מנת לתכנן מבנה מודולרי. פרקי הספר כוללים: התייחסות לצד המשפטי של בנייה מודולרית הכוללת פרוט בנושא כיצד להתייחס לבנייה מודולרית במסמכים משפטיים שונים הכוללים, בין השאר, מסמכי רישום, מסמכי מדידה, תוכניות עירוניות למסמכים משפטיים נדרשים ותוכניות אדריכליות והנדסיות; התייחסות לתוכניות העמדה של מבנה אחד או קבוצת מבנים מתועשים; התייחסות לדרישות של מערכות בנייה; התייחסות לתפעול ובנייה במפעל.

Arieff and Burkhart 2002

הספר כולל התייחסות משולבת לבנייה מתועשת דו ממדית ולבנייה מודולרית תלת ממדית. הוא כולל תיאור היסטורי של התפתחות הבנייה המתועשת ואח"כ דיון ב- 25 דוגמאות חדשניות של מבנים בבנייה מתועשת בחלוקה לשלושה רעיונות: ייצור, התאמה אישית, וקונספט.

Kieran and Timberlake 2003

אחד הספרים המשפיעים ביותר (במיוחד בצפון אמריקה) על השיח האדריכלי בנושא תיעוש. הספר דן במהפכות האחרונות בטכנולוגיה והשפעתן באדריכלות ובמיוחד על הצורך לשנות את האופן בו נבנים מבנים בעולם בכיוון של בנייה מתועשת.

Smith 2010

מדריך עדכני הדין בבנייה מתועשת תוך התמקדות בצפון אמריקה. המדריך כולל פרקים על ההיסטוריה של הבנייה המתועשת וההיסטוריה של אדריכלות מתועשת. מציג עקרונות, התייחסות לאלמנטים, הרכבה וקיימות. כולל פרק מקרי בוחן במגורים ובבנייה מסחרית.

א-3.4 ספרים מקצועיים מובילים מהעשור האחרון

Rupnik 2014

הספר סוקר את תעשיית הבנייה המתועשת בצפון אמריקה. הוא מחולק לארבעה חלקים נושאים: סקירת התעשייה; תפקיד האדריכל; יוזמות ברמת המאקרו (תגובה לאסונות); יוזמות ברמת המיקרו (דיון בפוטנציאל של בוסטון להפוך למעבדה לדיוור בר השגה ברמה מוניציפאלית ורמת המדינה).

הספר מציג ברמת פירוט מרשימה סקירה על מצב התיעוש בארה"ב בחלוקה למבנים מיוצרים (בד"כ מבנים בעלי קומה אחת) ומבנים מודולריים (מבנים המבוססים על יחידות מודולריות תלת ממדיות). כמו כן מציג הספר הסברים על הטכנולוגיות הקיימות, אפשרויות היישום שלהן בהקשר אדריכלי והמגבלות הכרוכות בכל שיטה. כולל הצגת פרטי הקמה ונתונים על מידות של מודולים ונתונים על מקרה בוחן בארה"ב.

Knaack et al. 2012

ספר מקיף, הדין במערכות בנייה מתועשות. הספר מחולק לפרקים לפי הנושאים הבאים: ההיסטוריה של התחום תוך התייחסות גלובלית להתפתחויות ביבשות שונות ולאדריכלים שהובילו את ההתפתחות בתחום; פרק על מגורים המתאר טכנולוגיות שונות של בנייה מודולרית, מתייחס לבנייה באתר ובנייה במפעל ומציג את נושא המגורים בחלוקה לתרבויות שונות; פרק המתייחס לבנייה לתעשייה בו מוצגות שיטות בנייה שונות; פרק על תהליכים הדין בעיצוב, תהליכי הבנייה, לוגיסטיקה והתקנה באתר. בנוסף מציג הפרק את היתרונות והחסרונות של תהליכים מערכתיים בבנייה מתועשת; פרק הדין ברכיבים מהם מורכבות היחידות המודולריות המציג את החלוקות למערכות ותתי מערכות והקשרים ביניהם ודין

בקלסיפיקציה של רמת התיעוש; הפרק האחרון דן בעתיד הבנייה המתועשת תוך התייחסות לטרנדים בעיצוב ממוחשב, בנייה באמצעות מחשבים, קיימות ומעמד האדריכל בבנייה מתועשת.

Smith and Quale 2017

אסופת מאמרים של כותבים מובילים בתחום האדריכלות בנושא בנייה מודולרית. האסופה מחולקת לשני חלקים: החלק הראשון מביא מאמרים בנושא תאוריה עכשווית של בנייה מודולרית. בין מאמרים אלא ניתן למצוא מאמר של רופניק שממפה את התעשייה בתחום בצפון אמריקה, מאמר שעושה קטגוריזציה של מערכות הבנייה השונות בתחום ומאמר שמתייחס באופן ספציפי לבנייה מודולרית של מגורים. החלק השני של הספר מתמקד בעיסוק עצמו בבנייה מודולרית. חלק זה כולל, בין השאר, מאמר המציג תוצאות סקר של מטה אנליזה של תעשיית הבנייה המודולרית, מאמר המתייחס לבנייה מודולרית של מבנים אקדמיים, ומאמרים על בנייה מודולרית ביפן, סקוטלנד ושבדיה.

Aitchison 2018

ספר שמציג את הבנייה המודולרית בפרספקטיבה רחבה המנסה לשלב אספקטים תאורטיים, סקירה היסטורית וטכנולוגית ותאור מקרה בוחן. כולל פרק שמציג סקירה היסטורית על פרסומים בנושא בנייה מודולרית, פרק שדן בבעיות ומחסומים של בנייה מודולרית ופרק שדן ברעיונות בבנייה מודולרית. בנוסף, מנסה הספר להציג תיזה על בנייה מודולרית והעתיד של הבנייה.

א-3.5 ירחונים מקצועיים בנושא בנייה מתועשת

השיח המקצועי באדריכלות עוסק בהרחבה בבנייה מתועשת, תוך התמקדות בבנייה מתועשת העושה שימוש ביחידות דו ממדיות. לעומת זאת, לא מצאנו ירחון מקצועי המתמקד בבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות.

בחלק גדול מהירחונים המקצועיים באדריכלות (בעיקר כאלה מאמריקה הצפונית) הופיעו בעשרים השנים האחרונות מספר חוברות שהתמקדו בבנייה מתועשת. בחלק מירחונים אלה הופיעו לעיתים מקרי בוחן שעשו שימוש בחלקים מתועשים תלת ממדיים כחדרי אמבטיה ושירותים. התמונה להלן מציגה כדוגמא את הירחונים בנושא בנייה מתועשת שיצאו החל מסוף המאה העשרים בעיתון Dwell, כפי שמופיע ב- <https://www.dwell.com>.



א-3.6 מאמרים אקדמיים נבחרים מתחילת המאה ה 21 בנושא מחקרים בבנייה מודולרית

השיח המקצועי והאקדמי באדריכלות עסק בהרחבה בבנייה מתועשת, תוך התמקדות בבנייה מתועשת העושה שימוש ביחידות דו ממדיות. מאמרים אקדמיים באדריכלות העוסקים בתחום של בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות ניתן למצוא בתחומים העיקריים הבאים:

- שיטות תכנון פרמטריות לתכנון מבנים
- אפשרויות בתכנון מודולים תלת ממדיים
- ייצור כלי תכנון
- שימוש במכולות
- התאמת דיירים
- שימוש במבנים מודולריים כפתרון זמני איכותי לאחר אסונות טבע כגון רעידות אדמה.

Diez et al. 2000

המאמר דן בשימוש במחשוב על מנת לייצר כלי שאפשר עיצוב של מבנה מודולרי בצורה קלה תוך שימוש ביכולות של תכנון פרמטרי. המאמר מציג כלי תוכנה שפותח בנושא בשם Automod3 לתכנון אוטומטי של מבנים מודולריים המבוסס על אוטוקאד. הגישה של המאמר מעניינת בראיה היסטורית אך אינה רלוונטית לתכנון הפרמטרי היום המבוסס על כלים מורכבים יותר העושים שימוש בשיטת ה BIM ותוכנות פרמטריות מתקדמות.

Jensen et al. 2009

המאמר מתאר פרויקט של מערכת בניינית גמישה לתכנון מודולרי בעץ, המבוססת על עקרונות הבנייה ה"רזה".

המאמר כולל סקירה על הבנייה המתועשת בשבדיה וההתפתחות לכיוון הדרישות של התאמה אישית אצל הצרכן השבדי. המאמר מציג שיטות להגדרת תהליכי עיצוב ובחירה במודולים שונים שפותחו בתחילת שנות ה-2000 בשבדיה וטוען שקיים מעבר מתהליך של עיצוב מודולים לתהליך של הגדרת קונפיגורציה של מודולים קיימים. המאמר בוחן את הקשר בין הצורך לעצב מבנים לבין המגבלות בעיצוב של מבנים מודולריים תוך הסתמכות על מקרה בוחן של פרויקט של חברת Tyréns AB (חברת יעוץ של AEC) שפתחה שיטת בנייה חדשה מודולרית. מסקנות המחקר שתכנון מודולרי שנתמך בעזרת מערכת קאד יוכל לעזור בפתרון ומניעה של מצבי אד הוק בתכנון להם יש משמעות כספית ותקציבית גדולה. יש דמיון גדול לשיטות המוצעות לשיטות שפותחו בתעשיית הרכב (משאיות סקניה). מערכות בנייה נוספות מעבר למה שתואר במקרה הבוחן מפותחות בזמן כתיבת המאמר בשבדיה.

Larsson et al. 2012

המאמר מציג רעיון של מתודה חדשה של יכולת לערום יחידות מודולריות, המבוססת על שיטות בנייה שבדיות בעץ (בנייה בעזרת לוחות למינציה של עץ). השיטה נותנת דגש מיוחד על היכולות להגיע לביטוי אדריכלי מורכב החורג מהאחידות המאפיינת בד"כ את הבנייה המודולרית. תוצאות המחקר מציגות ניתוח דיאגרמטי של אפשרויות גיבוב של יחידות שונות וכן פירוט של פרטי בניין של המבנה הסופי.

המאמר מתייחס לתוצרים קיימים של חברות בנייה שבדיות בעץ: Martinons group, Byggmma, Moelven ו-ASA.

מסקנות המחקר הן שבנייה מסוג זה עד כ-25 קומות היא עדיין כלכלית מבחינת עובי קירות העץ. החוקרים ממליצים על המשך בחינת הבנייה לגובה בשיטה זו לעומת מבנים נמוכים יותר, להם יש פתרונות מתחרים בטכנולוגיות אחרות.

Robinson et al. 2011

המאמר עוסק בבנייה מודולרית תלת ממדית המבוססת על מכולות. המאמר בוחן את ההתפתחות בתחום בסוף המאה העשרים ותחילת המאה העשרים ואחת דרך מספר מקרי בוחן. המאמר בוחן מספר שיטות תכנון ייצור, הכוללות שימוש במכולות קיימות

(MtO, Make to Order), ייצור של מכולות מיוחדות מותאמות (DtO, Design to Order) וייצור של מודול משתנה לפי תחזית (MtF, Make to Forecast). המאמר טוען ששימוש במכולות לבנייה מתבסס על תעשייה בינלאומית בוגרת שאינה תלויה בחסמים מקומיים ויכולה לספק כמויות גדולות של מכולות. המסקנה של המחקר ששימוש במכולות סטנדרטיות אומנם מהיר וחסכוני אך אינו מאפשר

גמישות תכנונית. לפיכך מצביע המחקר על השיטה של ייצור מודול משתנה לפי תחזית תוך שימוש בכלים פרמטריים לתכנון השינויים כשיטה הטובה ביותר לתחום זה.

Eren 2012

המחקר בוחן את הפוטנציאל של שימוש ביחידות בטון מודולריות לבנייה זמנית בעקבות אסונות טבע (רעידות אדמה) בטורקיה. המחקר מציג אפשרויות שונות לשימוש ביחידות סטנדרטיות ליצירת ואריאציות של מבנים ודירות מסוגים שונים.

המחקר טוען שבנייה זמנית מודולרית יכולה לייצר איכויות אדריכליות שאינן קיימות במבנים זמנים אחרים בעזרת היכולת לשילוב יחידות מסוגים שונים המותאמות באופן אישי לצרכים השונים של הדיירים והיכולת לייצור מרחבים אורבניים בעלי איכויות אדריכליות. בנייה מסוג זה עשויה לפי המחקר לתרום ליכולת ההתגברות על הפוסט טראומה בעקבות האסון, אם כי יש לבצע מחקרים נוספים שיאששו הנחה זו.

Park 2012

המחקר בוחן את הפוטנציאל של השימוש המודע של רעיונות במודולציה וסימטריה בתכנון למגורים כמתודות לקומפוזיציה של המבנה. המחקר עושה שימוש במבנים שתוכננו בתחילת המאה ע"י רודולף שינדלר כמקרה בוחן לבחינת החוקים של מערכת היחידות המבניות. המחקר מצא שהחוקיות ועקרונות הסימטריה בהן עושה שינדלר שימוש יכולים להתפתח למספר מפתיע של אלטרנטיבות תכנון.

המחקר טוען שניתן לעשות שימוש במערכת חוקים ועקרונות סימטריה מסוג זה בתכנון מבני מגורים עכשוויים ועל ידי כך להגיע למגוון פתרונות ולגיוון טופולוגי.

Lawson et al. 2012

המחקר סוקר טכנולוגיות לבנייה מודולרית ומתמקד בבנייה המודולרית של מבנה מגורים. המחקר מראה כיצד גישה סלולרית לבנייה מודולרית יכולה לייצר מגוון רחב של קונפיגורציות מבניות. המחקר בוחן מקרה בוחן של מבני מגורים בבנייה מודולרית של 12, 17 ו 25 קומות. תוצאות המחקר מתייחסות לנושאים הקשורים לפרטים הטכנולוגיים הכלליים, לקונסטרוקציה של המבנים, לבטיחות האש, ולקיימות (ראה התייחסות למאמר זה גם בתתי-פרק א-4, א-5, ו-א-6).

Sini 2013

דו"ח של מחקר MODCONS במסגרת תוכנית המחקר האירופאית FP7 הכולל שני חלקים רלוונטיים לארכיטקטורה: מסמך דו"ח כללי ומסמך הנחיות לארכיטקטורה. הדו"ח הכללי כולל: סקירה בנושא בנייה מודולרית למגורים; פירוט על הרגולציה בנושא הובלה של יחידות מודולריות; פירוט על הרגולציה בנושא מגורים; דיון בנושא מערכות מודולריות אופטימליות; דיון בפוטנציאל ובפרספקטיבה של השיטה ודוגמאות לסוגי מבנים ודירות מודולריות.

החלק העיקרי של המחקר מתייחס ליחידות מודולריות בגדלים גדולים (6.5x6.5) שאינם רלוונטיים לבנייה למגורים גבוהה עליה דנים במחקר זה. יחד עם זאת הפרקים הכלליים הדנים באפשרויות ההצבה של המודולים, הרגולציה, והפוטנציאל של השיטה נותנים פירוט רב על השיקולים בתכנון מבנה מודולרי.

לעומת הדו"ח הכללי, מסמך ההנחיות האדריכלי שהוכן ע"י משרד האדריכלים HTA Design LLP, מתייחס ליחידה בגודל דומה למקובל כיום 15X3.4X4.5 (אורך, גובה ורוחב). המסמך מציג באופן מקוצר אפשרויות של תכנון מבנים בשלושה קני מידה העושים שימוש ביחידות בגדלים אלה: מבנה בקנה מידה קטן, מבנה בקנה מידה בינוני ומבנה רב קומות.

Brown 2014

המסמך הבנוי כמצגת מרכז את המסקנות של פרויקט מחקר iLab של משרד אדריכלים בשם הייקוק קול. המחקר הובל ע"י בראון, אדריכלית שותפה בקבוצת המגורים של משרד האדריכלים. המחקר מסכם מסקנות של פרויקטי מגורים מודולריים בעיר וושינגטון בארה"ב. המסמך מציג סקירה קצרה על הטכנולוגיה, עקרונות תכנון, יתרונות וחסרונות ופרמטרים שונים אליהם צריך להתייחס כאשר מתכננים פרויקטים מודולריים. המסמך מציג את הנושאים בצורה טובה מאוד למנהלים ולגורמים שעושים את צעדיהם הראשונים בתחום.

כחלק מהמסך מוצגות אופציות לתכנון, ניתוח כלכלי, פרטי בניין, התייחסות לכל שלבי התכנון ועוד.

מסקנות המחקר הינם:

יתרונות:

- בנייה מודולרית חוסכת עד 50% מזמן ביצוע,
- יש פוטנציאל לחיסכון בעלות כוללת כאשר בונים עם עובדים מאוגדים באיגודים מקצועיים,
- יתרון מבחינת הקטנת בעיות בתיאום צוותי עבודה וניהול עבודות,
- מקטין את ההשפעה על הסביבה,
- מקטין תלות במגבלות כגון מז"א, ביטחון ושלביות.

חסרונות:

- סיכון גבוה בפרויקט ראשון של יזם עקב חוסר ביטחון של הלווים,
- צורך בהתמודדות עם תפיסת מבנים מודולריים כמבנים מכוערים, זולים ובאיכות נמוכה,
- חיסכון בבנייה מסוג זה אינו גבוה בווינגטון DC עקב עלויות בנייה נמוכות יותר ממקומות אחרים בארה"ב,
- צורך בהיכרות עם הנושא בזמן התכנון,
- משנה את המוכר בתהליכי הבנייה ויוצר חוסר וודאות אצל בעלי עניין רבים.

Sharafi et al. 2017

המאמר מציג מחקר המנסה לפתח שיטה פרמטרית/מתמטית אוטומטית לסידור יחידות מודולריות במבנים רב קומתיים בשלבים הראשונים של תהליך התכנון.

המחקר כולל פרק שמנסה להראות כיצד מציגים מבנה מודולרי רב קומות במטריצה שנובעת מבעיות קומבינציה. אח"כ מנסים לפתח באופן פרמטרי אפשריות לקומבינציות של יחידות מודולריות, חיבורים, קונסטרוקציה וכד'. בשלב אחרון מפותח מודל להצבה תלת ממדית של היחידות.

למרות שהמחקר נוגע באתגר גדול בבנייה מודולרית והפתרון המוצע פותח פתח רעיוני לקידום הפתרון במחקר עתידי, המחקר אינו מגיע לפתרון בר יישום הרלוונטי למחקר הנוכחי.

Sun et al. 2017

המאמר בוחן את היתרונות בשימוש במכולות לבנייה במגורים באקלים קר, בעיקר במקומות בהם קיים בתקופות ארוכות קושי לבנות עקב הטמפרטורות.

המאמר מציג סקירה היסטורית ביקורתית על נושא הבנייה המודולרית ומפתח אסטרטגיות תכנון ראשונית לבנייה מודולרית במכולות. מסקנות המחקר מצביעות על התרומה הפוטנציאלית של בנייה מסוג זה לקיימות ולהתפתחות תעשיית הבנייה כולה ועל החשיבות בפיתוח מחקר עתידי בנושא, אך אינן תורמות באופן ישיר לדיון על השימוש במכולות למגורים רבי קומות.

א-3.7 מראי מקום

Aitchison, Mathew. 2018. *Prefab Housing and the Future of Building: Product to Process*. London: Lund Humphries.

Albern, William F. 1997. *Factory-Constructed Housing Developments: Planning, Design, and Construction*. 1 edition. CRC Press.

Arieff, Allison, and Bryan Burkhart. 2002. *Prefab*. 1st edition. Salt Lake City: Gibbs Smith.

Brown, Abigail R. 2014. "FABULOUS-PRE-FAB_PRESENTATION-Hickok Cole Architects

Diez, Ramiro, M. Abderrahim, V. M. Padron, L. Celorrio, J. M. Pastor, and C. Balaguer. 2000. "Autmod3: An Automatic 3D Modularization System." *ISARC Proceedings*, September, 1–7.

Eren, Ozlem. 2012. "A Proposal for Sustainable Temporary Housing Applications in Earthquake Zones in Turkey: Modular Box System Applications." *Gazi University Journal of Science* 25 (1): 269–288.

"Factory-Constructed Housing Developments: Planning, Design, and Construction

- (Civil Engineering - Advisors): William F. Albern: 9780849374814: Amazon.Com: Gateway.” 2019. Accessed April 25. https://www.amazon.com/Factory-Constructed-Housing-Developments-Construction-Engineering/dp/0849374812/ref=sr_1_fkmrnull_1?keywords=factory-constructed+housing+development&qid=1556184447&s=gateway&sr=8-1-fkmrnull.
- Jensen, Patrik, Emile Hamon, and Thomas Olofsson. 2009. “Product Development through Lean Design and Modularization Principles.” In *Proceedings IGLC 17: 17th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*, 465–474. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ltu:diva-31379>.
- Kieran, Stephen, and James Timberlake. 2003. *Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction*. 1 edition. New York: McGraw-Hill Education.
- Knaack, Ulrich, Sharon Chung-Klatte, and Reinhard Hasselbach. 2012. *Prefabricated Systems, Principles of Construction*. Berlin, Basel: Birkhäuser. doi:10.1515/9783034611404.
- Lawson, R. Mark, Ray G. Ogden, and Rory Bergin. 2012. “Application of Modular Construction in High-Rise Buildings.” *Journal of Architectural Engineering* 18 (2): 148–154. doi:10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000057.
- Li, Xi Xuan, and Gu Lan Li. 2013. “Exploration of Modular Build of Architectural Space.” *Applied Mechanics and Materials* 357–360: 338–344. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.357-360.338.
- Montoliu-Hernández, Juan, and Jorge Rodríguez-Álvarez. 2017. “Renascent Urbanism: Reviving Derelict Structures in the Wake of the Crisis.” *Architectural Science Review* 60 (4): 286–298. doi:10.1080/00038628.2017.1336979.
- Meow, J., <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3139504>
- Park, Jin-Ho. 2012. “The Interplay of Modular Idea and Symmetry in Rudolph M. Schindler’s Housing.” *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 11 (2): 335–342. doi:10.3130/jaabe.11.335.
- Robinson, Adrian, Simon Austin, and Gibb. 2011. “Efficiencies in Design and Manufacturing For Construction Using Shipping Containers.” In *In: Egbu, C. and Lou, E.C.W. (Eds.)*, 33–42. Bristol, UK: Association of Researchers in ConstructionManagement.

https://www.academia.edu/2931604/EFFICIENCIES_IN_DESIGN_AND_MANUFACTURING_FOR_CONSTRUCTION_USING_SHIPPING_CONTAINERS.

- Rupnik, Ivan, ed. 2014. *Mass Production*. Boston, Mass: Northeastern University School of Architecture. https://technionmail-my.sharepoint.com/personal/modular3d_technion_ac_il/_layouts/15/onedrive.aspx?id=%2Fpersonal%2Fmodular3d%5Ftechnion%5Fac%5Fil%2FDocuments%2FModular3D%2FLiterature%2FArchitectural%20Aspects%2FMass%2EProduction%5FISSUU%2Epdf&parent=%2Fpersonal%2Fmodular3d%5Ftechnion%5Fac%5Fil%2FDocuments%2FModular3D%2FLiterature%2FArchitectural%20Aspects.
- Sharafi, Pezhman, Bijan Samali, Hamid Ronagh, and Maryam Ghodrat. 2017. "Automated Spatial Design of Multi-Story Modular Buildings Using a Unified Matrix Method." *Automation in Construction* 82 (October): 31–42. doi:10.1016/j.autcon.2017.06.025.
- Sini, Kotilainen. 2013. *Report on Modular System for European Residential Market*. MODCONS D 2.1, Grant Agreement No. 315274. Development of Modular Construction Systems for High-Rise Residential Buildings.
- Smith, Ryan E. 2010. *Prefab Architecture: A Guide to Modular Design and Construction*. 1 edition. Hoboken, N.J: Wiley.
- Smith, Ryan E., and John D. Quale, eds. 2017. *Offsite Architecture: Constructing the Future*. 1 edition. London ; New York: Routledge.
- Sun, Zexin, Hongyuan Mei, and Ruixian Ni. 2017. "Overview of Modular Design Strategy of the Shipping Container Architecture in Cold Regions." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 63 (May): 012035. doi:10.1088/1755-1315/63/1/012035.

א-4. היבטים מבניים (קונסטרוקציה)

Lawson et al. 2005

המאמר סוקר שיטות בנייה עיקריות לפי:

- (1) חומרי בנייה בסיסיים לעבודה אינטנסיבית באתר (כגון בטון, לבנים)
 - (2) רכיבים המשמשים לבנייה באתר
 - (3) רכיבים דו ממדיים (D2) שמורכבים באתר, כגון קירות או מסגרות מבניות
 - (4) רכיבים תלת ממדיים (D3) רכיבים בצורה של מודולים שמובאים מוכנים לאתר
 - (5) מערכות בניין שלמות שמובאות לאתר מוכנות לשימוש.
- שיטות נפוצות לבנייה מודולרית עם פלדה בבנייה אזרחית הן:

1. מסגרות פלדה קלה.

בדרך כלל קירות עם קורות C בעומק של 65 עד 200 מ"מ ועובי פלדה של 1.2 עד 2.4 מ"מ.

2. בנייה מודולרית.

מודולים תלת ממדיים מורכבים מחוץ לאתר הבנייה. בדרך כלל מדובר ב- (א) מודולים מרובעים בהם העומסים מועברים דרך הקירות, (ב) מודולים פתוחים בהם העומסים האנכיים מועברים דרך עמודים פינתיים.

3. מודולים היברידיים ושיטות פנלים.

מודולים היברידיים או משולבים משתמשים ברכיבים D2 וגם D3. מודלים אלה מאפשרים יתר גמישות בבנייה לגובה.

במאמר מובאות דוגמאות שונות של פתרונות הנדסיים לשלד מפלדה עבור המודול הבסיסי ודרכי חיבור המודולים באתר הבנייה לרבות סוגי המחברים הנדרשים.

המאמר מתייחס בעיקר לבתי מגורים ומבני מגורים פשוטים, מתייחס בעיקר לשני סוגי המודולים הבסיסיים שהוזכרו למעלה אך גם מרחיב בשיטה של "מבנים פתוחים" המתארת שיטה המאפשרת גמישות בחלוקה הפנימית של היחידות המורכבות.

המאמר סוקר סידרת בדיקות שנערכו במיוחד עבור קונסטרוקציות קלות מפלדה, בנויות מפלדת דקת דופן, תוך השוואתן לקונסטרוקציות בנויות מפרופילי פלדה מעורגלים.

Annan et al. 2008

בנייה מודולרית מפלדה (Modular Steel Building – MSB) מתפתחת במהירות כשיטת בנייה עדיפה על שיטות מסורתיות של בניית שלד פלדה באתר. שיטה זו נפוצה מאד בצפון אמריקה, יפן

וחלקים מאירופה. היתרונות הבולטים של השיטה הינם מהירות הבנייה ובקרת האיכות של תהליך הבנייה.

המאמר מתמקד בתכנון ובדיקת התנהגות של רצפות היחידות המודולריות, באמצעות בדיקת יחידות מבנה מודולרי המיועדות למעון בן ארבע קומות. בכל קומה שש יחידות מבניות זהות. רצפת היחידות מורכבת משתי קורות ראשיות (beams) אורכיות באורך כולל של 16.50 מטר ואחת עשרה קורות רוחביות - משניות (floor stringers) במפתח של 3.60 מטר. חיבורי הקורות באמצעות ריתוכים. המאמר מנתח את השפעת החיבור בריתוך של הקורות המשניות לראשיות, תוך יצירת ריתום חלקי בסמך חיצוני של הקורה המשנית, במקום ההנחה המקובלת של חיבור פרקי. משטח הדריכה של היחידות: בטון מרוכב (יציקה על פח צורני). האנליזה נערכה בשיטת אלמנטים סופיים. האנליזה מראה שונות בין שיטות החישוב השכיחות לבין תוצאות אנליזה מבוססת אלמנטים סופיים של מסגרות רצפה מודולריות. שונות זו באה לידי ביטוי בהתנהגות האמיתית של חיבורי הרייתוך והבנייה המרוכבת שגורמת לחלוקת כוחות ומומנטים שונה מהתוצאות המתקבלות באמצעות שיטות חישוב מקובלות שאינן מביאות בחשבון מומנט ריתום חלקי בסמך חיצוני.

כוחות ציריים (axial forces) מתפתחים בקורות הרצפה הרוחביות/משניות (stringers) ומומנטים שליליים (hogging moments) מתפתחים בקצה אותן הקורות. בדרך כלל, תופעה זאת איננה מוכרת על ידי המתכננים והיצרניים של MSB ולכן עלול להיווצר מצב של תכנון לא נכון של קורות הרצפה ושל החיבורים ביניהם לבין מערכת הרצפה. מבחן פרמטרי (parametric) נותן תוקף נוסף לחשיבות של כוחות ומומנטים אלה.

המחקר מוכיח גם שחיבורי הרייתוך חייבים להעביר מומנט כפיפה משמעותי וכוח צירי, בנוסף לכוחות גזירה (vertical shear forces) מהקורות המשניות לקורות הראשיות.

המחקר מציע מודל חישוב פשוט עבור מומנטי הרייתום בקצוות הקורות המשניות המביא בחשבון את השפעת מחבר הרייתוך בין הקורות המשניות לקורות הראשיות.

Lawson 2008

הקשיחות, החוזק והשלמות המבנית של מסגרות פלדה קלה בבנייה מודולרית היא חשובה שכן אלה שיטות יחסית חדשות בהם למרכיבים יש מגוון רחב של קשרים הדדים. המחקר התרכז בתוצאות של נזקים בבניינים מודולריים עקב תקלות, פיצוצים או אפילו פעילויות טרור.

המאמר בוחן שיטות בנייה מבוססות שלד קל מפלדה (פלדת דק דופן) בבנייה מודולרית לאור השפעותיהן על עמידות המבנה.

כדי לבחון זאת, החוקרים בצעו סדרת ניסויים מסוג Stressed Skin Test במבנים מודולריים. המאמר דן בסוגים שונים של כשלים מבניים ומנתח מערכות אלטרנטיביות של זרימת כוחות ועומסים. במקרה של כשל של אחד הסמכים הפנימיים, מודולים יכולים לתפקד כקורות גבוהות, במשטר שקיעות

מינימליות. בזמן שסמך פינתי כושל, מתפתחת מערכת הקשחה נגד פיתול הגורמת לרדיסטריבוציה של המאמצים מבלי לגרום להתמוטטות, תוך יצירת מנגנון של זיז המרחף באוויר ללא סמך קיצוני. בשלד פלדה מבוסס מסגרות תלת ממדיות, במקרה של נזק באחד או יותר מהרכיבים, מתאפשרת יצירה של מערכת קבלת כוחות ועומסים חלופית המונעת כשל היחידה המבנית. המחברים טוענים שנדרשת תסבולת יחסית קטנה במחברים בין המודולים על מנת לאפשר חלוקה מחדש של עומסים ומאמצים. יתרה מזאת, הם מציינים שמודולים הסמוכים למודול שנפגע הם בעלי תסבולת עודפת המספיקה על מנת לאזן ולתמוך בחלקים של בניין שניזוקו. תהליך זה של חלוקה מחדש של עומסים רלוונטי רק במקרה של כשל מקומי ולא מתייחס למצבים של הגברה דינמית של עומסים כדוגמה במקרה של התמוטטות בשרשרת.

Lawson and Richard 2010

בנייה מודולרית הכוללת ייצור של יחידות תלת ממדיות מושלמות הינה בשימוש נרחב בבניינים בעלי 4 עד 8 קומות. לאחרונה מתעורר עניין להרחיב שיטת בנייה זו גם לבניינים בעלי 12 קומות ויותר.

המאמר סוקר שיטות בנייה מודולריות ומציג בדיקות העמסה ואנליזה של קירות בנויים עם שלד מפלדה דקת דופן. המאמר דן בשיטת תכן עבור מבנים רבי קומות המביאה בחשבון את הסבולות של הרכבת המודולים באתר הבנייה.

המאמר מזכיר מבנה שנבנה במזרח לונדון, ה-Paragon, מבנה בו המודולים המרחביים נבנו עם עמודי פינה שהעבירו את העומסים האנכיים ממודול למודול בעוד שהעומסים האופקיים הועברו לגרעין מרכזי מבטון מזוין יצוק באתר. כמו כן מוזכרים פרויקטים נוספים של מבנים בני 8 עד 12 קומות, לרבות מבני מגורים ומבני מעונות סטודנטים.

שתי השיטות הנפוצות ביותר, לטענת המחברים, לבנייה מודולרית של יחידות מודולריות הנם:

(א) העומס מועבר דרך קירות המעטפת של המודולים

(ב) העומס מועבר דרך קורות אורכיות לעבר עמודי פינה.

השיטה הראשונה מאפשרת, בדרך כלל, בנייה של 4 עד 8 קומות, תלוי בגודל של קורות C (C sections) ובמרחק ביניהן.

בשיטה השנייה, עמידות תחת לחץ (compression resistance) של העמודים הפינתיים היא הגורם המכריע, ולכן מרבים להשתמש בפרופילי SHS (Square Hollow Sections) בגלל התסבולת לכפיפה הסימטרית שלהם. גובה הבניין תלוי בגודל ה-SHS שניתן להשתמש.

המאמר מציג ממצאים של ניסויים בעמסה על קירות פלדה דקת דופן כדי לבחון בנייה מודולרית של עד 12 קומות. המאמר מנתח את השפעת המחברים בין מודול למודול על היציבות הכוללת של המבנה

כולו תוך בדיקת הסטיות (האקסצנטריות) בהתאם לסבולת ההרכבה של מודול אחד כלפי השני (מודול מעל מודול).

Kim and Jung 2011

המחקר בודק התנגדות להתמוטטות בשרשרת כתוצאה מכשל באחד העמודים במבנים מודולריים המבוססים על סידרת מסגרות זהות המרכיבות מגה-מסגרת (בלשון החוקרים "mega-frame").

לצורך המחקר נבחנו 4 סוגי מערכות שונות של מבנים מורכבים ממסגרות זהות. המחקר התמקד בניתוח נתונים לא ליניאריים של מסגרות מורכבות מתתי מערכות של מסגרות (קורות ועמודים), על ידי הוצאת אחד מעמודי הקומה ראשונה.

הממצאים מראים שמערכת המסגרת בעלת 4 עמודי פינה לא סיפקה את התוצאות של התכנון להתנגדות להתמוטטות שרשרת כאשר אחד העמודים של הקומה הראשונה הוצא ממקומו.

כדי לשפר את ההתנגדות להתמוטטות בשרשרת, החוקרים עיצבו מחדש את המודל הבסיסי של 4 עמודים על ידי הוספה של:

- (1) הוספת אלכסוניים בדפנות המודולים (הפיכת המסגרות למסבכים)
- (2) הפיכת המסגרות ההיקפיות לבעלות יכולת התנגדות למומנטי כפיפה
- (3) הגברת התסבולת למומנטי כפיפה של המסגרות המרכיבות את היחידות המודולריות, פנימיות וחיצוניות.

התוצאות מראות שהפיכת המסגרות למסבכים באמצעות הוספת אלכסונים הייתה הכי יעילה בתגבור ההתנגדות להתמוטטות בשרשרת בבניינים עם מגה מסגרות. יתרון נוסף בהפיכת המסגרות למסבכים הינו שימוש חסכוני ויעיל בפלדה. הוספת האלכסונים תרמה לכך שיותר פריטים השתתפו במניעת התמוטטות. לסיכום, החוקרים ממליצים על הוספת אלכסונים בתכנון של מערכות מורכבות ממגה מסגרות.

Franke and Hausammann

יחידות מודולריות מלוחות עץ מסיביים מוכרות בבנייה של מבנים חד קומתיים, אך לא בבניית מבנים רבי קומות מעץ. המאמר סוקר מערכת של יחידות תלת ממדיות מעץ בצורה של קופסה חלולה מחוזקת בעזרת צלעות שניתן ליישם גם במבנים רבי קומות.

מסקנות החוקרים היא שבנייה מבוססת על יחידות מודולריות שונה מבנייה של פנלי עץ קלים. הבנייה המודולרית יעילה יותר לאור ניצול הפעולה המרחבית והודות לחיבורים בהדבקה בין כל מרכיבי העץ. לדעת החברים השיטה נמצאה מאד יעילה במונחים של סטיקה ושל בידוד תרמי, כאשר גם המאפיינים הכלכליים של תהליך הייצור וההרכבה נמצאו יעילים.

Fathieh and Mercan 2014

לאור סוגי המחברים שדרושים בבנייה המודולרית מבחינת דרישות הייצור וההרכבה, מבנים אלה מועדים לכשלים בעת רעידות אדמה. בהקשר זה, במבנים רבי קומות בבנייה מודולרית מפלדה דק דופן (Modular Steel Buildings), אם ישנה אי רציפות בעמודים המתחברים בין יחידה מודולרית אחת לזו שמתחתיה, קיימת רגישות ונקודת תורפה בחיבור. נקודת תורפה משמעותית קיימת במקרה של כשל בעמוד או במחבר לרבות כתוצאה מחוסר גמישות בחיבורים האנכיים. המחברים מציינים שאין נתונים על התנהגות מבנים מסוג MSB במשטר עומסים הפועלים עליהם בזמן רעידות אדמה.

לצורך הערכה של עמידה של מבני MSB ברעידות אדמה, נערכו 3 אנליזות דינמיות לא ליניאריות על 4 מבני MSB עם 48 מודולים. בנוסף הופעלה אנליזת (IDA) Incremental Dynamic Analysis כדי להעריך את מידת הנזק האפשרית.

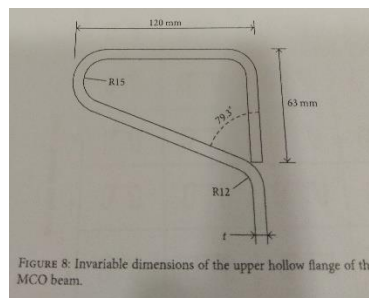
הניסויים והמודלים החישוביים אפשרו לקבוע שההתנהגות התלת ממדית של היחידות מנטרלת השפעות הפיתול. בנוסף צוינה חשיבות הפיכת דפנות היחידות הבודדות למסבכים מישורים המצטרפים מיחידה מודולרית בודדה למכלול המורכב מכל היחידות. עבור המבנה שנבדק נבדקו גם ערכים כמותיים למרכיבים השונים לרבות המחברים, האלכסוניים, חתכי הקורות, וחתכי אלמנטים אנכיים.

Ha et al. 2016

המאמר מציג שיטה לפיתוח מקטעי קורות פלדה יעילים במסגרת של בנייה מודולרית. השיטה מבוססת Six-Sigma. Six-Sigma היא מתודולוגית לשיפור הייצור והיעילות של הייצור והמוצר, שפותחה על ידי "מוטורלה" בתחילת שנות השמונים של המאה הקודמת. שיטת הייצור הפכה לפופולרית בקוריאה החל משנות ה-90, גם בתהליכי בנייה, כדי להשיג מקסימום יעילות.

בהמשך למתודולוגיה זו, נסקרו ודורגו דרישות של לקוחות (חברות בנייה) כמו כמות הפלדה הנצרכת, עלויות ייצור, נושאים לוגיסטיים, קלות ההרכבה, בטיחות ועוד.

העדפות של הלקוחות בנושאים אלה תורגמו למאפייני איכות רצויים של קורות פלדה בצורת תעלה. לאחר בחינת מספר חלופות, נבחרה צורת קורה עם דפנות חלולים בשני הצדדים מפלדת דק דופן, לפי התמונה המצוטטת.



שלושה קריטריונים מתוך העדפות של הלקוחות נבחרו כמרכזיים: אורך ההלחמה ליחידת אורך, כוח האינרציה לכל חלקי שטח של הקורה, ומשקלן של קורות רצפה לפי יחידות שטח. פיילוט שנערך עם הקורות בצורה הנבחרת הראה ירידה משמעותית במשקל של קורות רצפה (כ-18% לאורך סטנדרטי של 7.5 מטר).

Gunawardena et al. 2016

המאמר עוסק בהתנהגות בניינים מודולריים מבוססים על יחידות בנויות בשיטת התמיכות הפינתיות (corner supported modules) תחת משטר עומסים סיסיים.

מסקנות המחקר הינן:

1. החיבורים שמחברים בין המודולים משמעותיים מאד בהקשר לדרך העברת העומסים האופקיים ואיך המבנה המודולרי עומד בהם.
2. על פי התוצאות שנצפו, במבנים מתפתחים פרקים (hinge formation) בעמוד הפינתי הראשי מיד תחת קורת הרצפה או מעליה. היווצרותם של פרקים אלה עלולה לגרום להתמוטטות במקרה של רעידות אדמה.
3. ניתן לתכנן לדרגות שונות של עוצמות של רעידות אדמה בהן היחידות מסוגלות לעמוד בתנועות קרקע מבלי להתמוטט.
4. המשיכות (ductility) של קורות פינה מהווה גורם משמעותי להשגת התנהגות טובה יותר במקרה של רעידת אדמה.

Shirokov et al. 2016

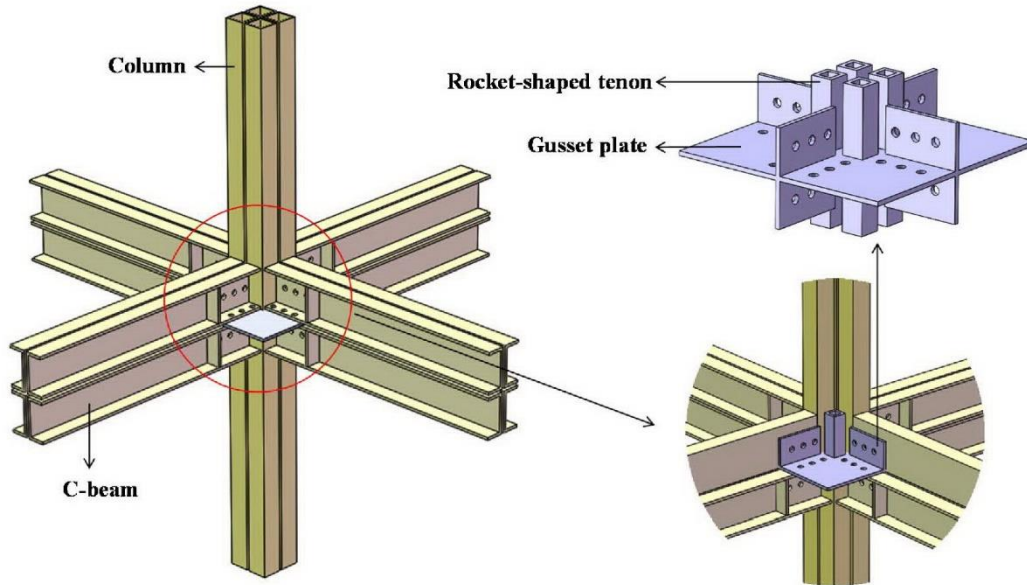
המאמר עוסק בהשפעות מידת הקשיחות של אלמנטים אנכיים ואופקיים על התדירות העצמית של הוויברציות.

לאור המחקר, החוקרים טוענים :

1. לתדר העצמי (של הוויברציה - natural vibration frequency) של מבנה נושא חשיבות מכרעת בקביעת העמידות כנגד עומסים דינמיים, כגון אלה של רעידות אדמה, רוחות עזים ועוד.
2. התדירות של ויברציות רוחביות של בניין היא כמעט בלתי תלויה בגודל המבנה, כאשר היחידות המרכיבות אותו מחוברות פירקית ביניהן רק בפינות ומסודרות באותו כיוון.
3. ההשפעה של אלמנטים מסגרתיים אופקיים אינה ניתנת להזנחה בזמן קביעת התדירות העצמית במבנים מודולריים.
4. הנוסחה שפותחה במחקר לקביעת התדירות העצמית הראשונה מתאימה למתקבל בחישוב נומרי באמצעות FEM (finite element method).
5. כאשר העומס גדל, התדירות העצמית הראשונה מצטמצמת, תוך השפעה גדולה על גודל העומסים הדינמיים.

Deng et al. 2017

המחברים מציגים פיתוח של מחבר חדש המתאים לחיבור של יחידות מודולריות מפלדה. המחבר מוצג בפינה הימנית העליונה של האיור להלן המצוטט מהמאמר.



אל המחבר מתחברים באמצעות ברגים שמונה עמודים בחתך RHS (מפגש של ארבע יחידות מודולריות: ארבעה עמודים של היחידות בקומה N וארבעה עמודים של היחידות שבקומה N+1) ושש עשרה קורות בחתך C (או U).

המחברים פתחו מודל אנליטי לחישוב אורך הקריסה של העמוד בפעול עליו עומס צירי ללא מומנטי כפיפה. המודל מבוסס על ההנחה שבתחום המחבר הקשיחות לכפיפה של העמוד שווה לסכום הקשיחויות האלגברי של המחבר ושל העמוד. המחבר מקטין את אורך הקריסה של העמוד ביחס למצב תאורטי שבו העמוד מעל והעמוד מתחת היו מחוברים זה לזה בריתוך (ללא מחבר כלשהו). הקטנת אורך הקריסה מביאה במקביל להגדלת תסבולתו של העמוד לכוח לחיצה צירי המתפתח בו.

המחברים מציגים תוצאות של אנליזה פרמטרית של המשתנים השונים, אשר המשמעותיים שבהם הם אורך המחבר ועובי הפחים שלו, ומראים כי הקטנת אורך הקריסה תלוי בעיקר בשני משתנים אלה. המחברים אימתו את תוצאות המודל האנליטי שפיתחו באמצעות תוצאות ניסוי ובאמצעות סימולציה ממוחשבת באלמנטים סופיים (באמצעות תוכנת ABAQUS) של מודלים תלת ממדיים.

הם מסיקים שניתן לתכנן את העמודים בדרך מפשטת באמצעות אלגוריתם התכן המופיע ביורוקוד EC3 תוך התחשבות בתרומתו של המחבר להורדת אורך הקריסה אשר מגדילה כאמור את תסבולת העמוד.

Li et al. 2017

המחברים מציגים חישוב של אורך הקריסה (K factor) של עמודים לחוצים במבנה מודולרי מפלדה. הנחת היסוד שהיציבות האופקית הכללית של המבנה מובטחת באמצעות מערכות הקשחה פנימיות בתוך המסגרות (Bracing) ולכן הפיתוח המוצע על ידי המחברים הוא עבור מבנה מוחזק.

העומסים האנכיים במבנה המורכב ממודולים עוברים דרך עמודי המודול באופן נקודתי (ולא דרך קירות המודול, באופן רציף).

החיבורים בין עמודי המודולים הינם קשיחים למחצה.

המחברים מנסחים את בעיית הקריסה של העמודים באמצעות משוואות "שיפוע המיתר" (Slope-deflection). מכיוון שהפתרון הנומרי של המשוואות מורכב מדי לטעמם כדי לשמש מהנדסים בפרקטיקה, הם מתאימים את ה"כלל הצרפתי" לחישוב K factor המקובל בתקן האירופי אל הפתרונות הנומריים שקיבלו מהפתרון הנומרי המורכב. התאמה הזו מייצרת ביטוי פשוט, שנותן פתרון שמרני ביחס לפתרון הנומרי המלא, בטעות שאינה עולה על 6% במקרה הקיצוני ביותר ובדרך כלל אינה עולה על 1.35%.

המחברים מדגימים גם פתרון באמצעות תוכנת האלמנטים הסופיים SAP2000 של מבנה מודולרי בגובה של 6 קומות. אי הדיוק של הנוסחה המפשטת ביחס לפתרון שהתקבל בשימוש בתוכנת האלמנטים הסופיים הוא בסדר גודל של 5% כאשר הנוסחה המפשטת לא הייתה על צד הביטחון.

המסקנה העיקרית שעולה מהמחקר המוצג במאמר הוא שבחישובי קריסה של עמודי מבנה מודולרי אין להשתמש בביטויים הרגילים הנמצאים בתקינה של מבני פלדה. גם הנחת יסוד (שמרנית לכאורה) שניתן להתייחס לחיבורים שבין המודולים כחיבורים פרקיים עלולה להביא להערכת יתר מוטעית של התסבולת לכוחות ציריים של עמודי המבנה המודולרי.

Sharafi et al. 2017

המחברים משתמשים בשיטה מתמטית לפתרון בעיה של אופטימיזציה קומבינטורית לצורך תכנון אוטומטי מוקדם של מבנה קומות מודולרי. בדיסציפלינות של כלכלה וניתוח עלויות קיים אלגוריתם מוכר בשם 3DAP (Three-Dimensional Assignment Problem) למציאת פתרון אופטימלי לפונקציה מרובת מטרת הכפופה לאילוצים קיימים.

בעבודה המוצגת על ידי המחברים המטרות הן העלות של המבנה המודולרי, היעילות של התכנון הקונסטרוקטיבי והיעילות האנרגטית של המבנה. היעילות של התכנון הקונסטרוקטיבי נמדדת ברגולריות של התכנית הקומתית: ככל שהמרחק בין מרכז המסות בקומה למרכז ההתנגדות של

הרכיבים שמקבלים את הכוחות האופקיים מצטמצם – התכנון הקונסטרוקטיבי מקבל ציון גבוה יותר. היעילות האנרגטית נמדדת ביחס שבין שטח מעטפת המבנה לבין נפחו של המבנה. ככל שיחס זה קטן יותר היעילות האנרגטית מקבלת ציון גבוה יותר.

המחברים עושים שימוש במטריצה הקרויה DSM (Design Structure Matrix) המבטאת את הקשרים השונים שבין המודולים ותת המודולים המרכיבים את המבנה. הם משכללים את הרעיון של מטריצה דו-ממדית לכדי מטריצה תלת ממדית כדי לפתור את בעיית האופטימיזציה הנזכרת לעיל.

פתרון בעיית האופטימיזציה נעשה באמצעות האלגוריתם המתמטי המוכר לפתרון בעיות באופטימיזציה קומבינטורית: Ant Colony ("מושבת הנמלים").

המחברים מדגימים את השיטה על דוגמא של מלון קטן תלת קומתי, בן 45 חדרים, שנבנה באוסטרליה, שסך השטח הבנוי שלו הוא 1,008 מ"ר ושטח המעטפת הוא 680 מ"ר, ואשר שלושה סוגי מודולים הרכיבו את המבנה המודולרי: יחידת מגורים, יחידת מסדרון ויחידת חדר מדרגות.

Ye and Wu 2017

המחברים מתארים שיטה לאופטימיזציה של תכן סיסמי למבנה חדשני הכולל מבנה ראשי (גרעין מרכזי) אשר אליו מחוברות בתלייה יחידות מודולריות (כמודגם באיור להלן המצוטט מהמאמר) המהוות מבנה משני שמסייע בספיגת האנרגיה בזמן רעידת אדמה ומשפר את ההתנהגות הסיסמית של המבנה כולו.

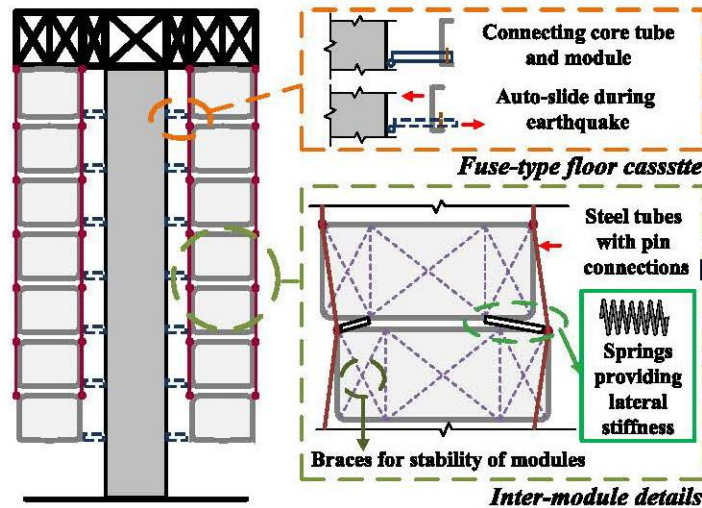
המבנה המתואר באיור להלן כולל גרעין מרכזי בן 10 קומות. גובה כל קומה 4 מטר. בראש הגרעין מסבך פלדה בגובה קומתי (4 מטר) וממנו תלויות 9 קומות המורכבות מיחידות מודולריות נפחיות.

הרצפות של היחידות המודולריות משמשות כנתיך (Fuse) באופן כזה שהן מחוברות באופן קשיח לגרעין המרכזי ומעבירות את כוחות הרוח מהיחידות המודולריות לגרעין. אולם ברעידת אדמה, קסטות אלו נשברות ואז נוצרת תנועה יחסית בין היחידות המודולריות לבין הגרעין. קינמטיקה זו מאפשרת ספיגה של אנרגיה על ידי מרסנים וקפיצים באופן שיתואר בהמשך.

באופן כללי בסוג המבנה המתואר במאמר קיימות שתי שיטות עיקריות המתועדות בספרות המקצועית לספיגת האנרגיה בעת רעידת אדמה:

הראשונה מבוססת על קשיחות יחסית גבוהה בין יחידה מודולרית ליחידה שמעליה (או מתחתיה) וחיבור גמיש יחסית בין היחידות לבין הגרעין המרכזי.

השנייה מבוססת על חיבור רק של היחידה המודולרית בראש המבנה המשני והיחידה המודולרית בתחתית המבנה המשני אל המבנה הראשי (הגרעין המרכזי). שאר היחידות המודולריות מחוברות בין לבין עצמן, אך לא מחוברות למבנה הראשי.



השיטה השנייה דומה מבחינה עקרונית לעקרונ הריסון באמצעות מסה עם תדר מכוון (TMD – Tuned Mass Damper) אולם יחס המסות בין המבנה המשני למבנה הראשי בשיטה המוצגת במאמר הוא הרבה יותר משמעותי מאשר יחס המסות המקובל בשיטת TMD הקונבנציונלית. בנוסף קיימים מרסנים בין כל מודול למודול שמעליו ומתחתיו.

קיימות שתי שיטות נוספות (תקראנה להלן השיטה השלישית והשיטה הרביעית) לספיגת אנרגיה בבנייה מודולרית, אך בסכימה שונה מהסכימה המתוארת באיור שלעיל. השיטות הן:

השיטה השלישית מבוססת על העמדת המבנים המודולריים על רצפות נושאות של המבנה הראשי על גבי מבודדי בסיס.

השיטה הרביעית מבוססת על העמדת קומה על קומה של המבנה, כאשר בין קומה לקומה מפרידים סמכים מבודדים.

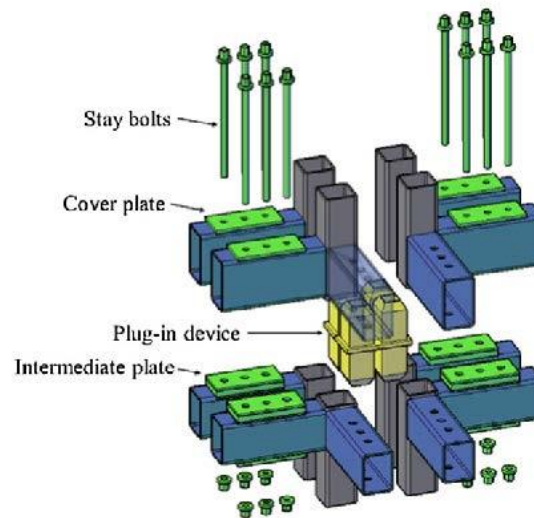
המחברים מתמקדים בפתרון הבעיה הדינמית של השיטה המבנית השנייה. הם פותרים בעיה באופטימיזציה באמצעות אלגוריתמים גנטיים (GA – Genetic Algorithms) בשתי דרכים. הדרך הראשונה כוללת פונקציית מטרה המביאה למינימיזציה של ההסטות הבינ-קומתיות (Drifts) של המבנה הראשי. הדרך השנייה כוללת שתי פונקציות מטרה: מינימיזציה של ההסטות הבינ-קומתיות של המבנה הראשי ושל המבנה המשני.

ה"מחיר" שמשלמים בשיטה זו הוא של הסטות בינ-קומתיות גדולות יחסית של המבנה המשני אשר במבנה רגיל היו עלולות לגרום לנזקים ברכיבים משניים. אולם בשיטת הבנייה המודולרית רואים בכל יחידה מודולרית אלמנט קשיח וההזזה הבינ-קומתית מתרחשת אך ורק בממשק שבין כל יחידה מודולרית לבין זו שתחתיה או זו שמעליה.

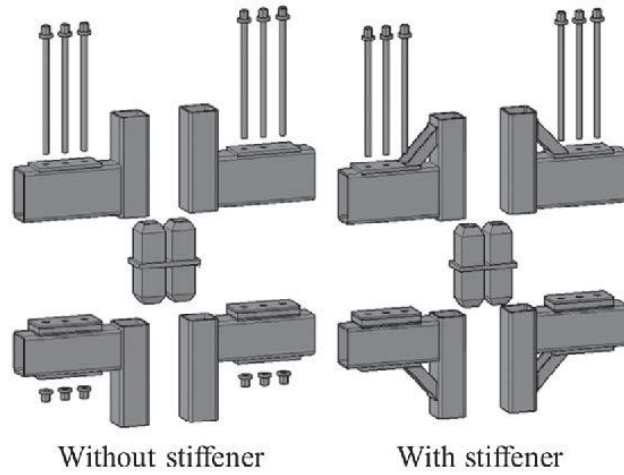
Chen et al. 2017

המאמר עוסק במחברים של יחידות מודולריות נפחיות משלד פלדה הבנויים בשיטת MSB (Modular Steel Buildings). המחברים נלקחו מתוך מבנה משרדים מודולרי אמיתי ארבע קומתי בסין. לכל יחידה נפחית שגודלה כגודל חדר, ארבעה עמודי פלדה מחתך ריבועי חלול במידות של 150/150 מ"מ. במפלס הרצפה ארבע קורות מחתך מלבני חלול במידות של 250/150 מ"מ וארבע קורות במפלס התקרה מחתך ריבועי חלול במידות של 150/150 מ"מ.

קיים קושי של גישה אל המחברים המחברים עמודים פנימיים במבנה. זאת מכיוון שהיחידות מגיעות כבר מוגמרות כולל קירות ומחיצות, וכך ארבעה מודולים נפגשים בקו פנימי אחד שאיננו חלק מהמערכת הפריפרלית (חזית). בצומת פנימי של ארבעת המודולים נוצר מפגש של ארבעה עמודים כמעט צמודים זה לזה ושל 8 קורות (שני צלבים, זה מעל זה, של חיבורי קורות; בכל צלב 4 קורות). צומת כזה מתואר באיור המצוטט להלן. המחבר כולל אביזרי שקע-תקע לחיבור ארבעת העמודים בצומת. החיבור עצמו נעשה באמצעות ברגים ארוכים המחברים כל קורה לקורה שמעליה. למרות שאביזר השקע-תקע מייצר לכאורה חיבור פרקי – המחבר בכללותו לאחר שהודקו הברגים מסוגל להעביר מומנטים בצמתים.

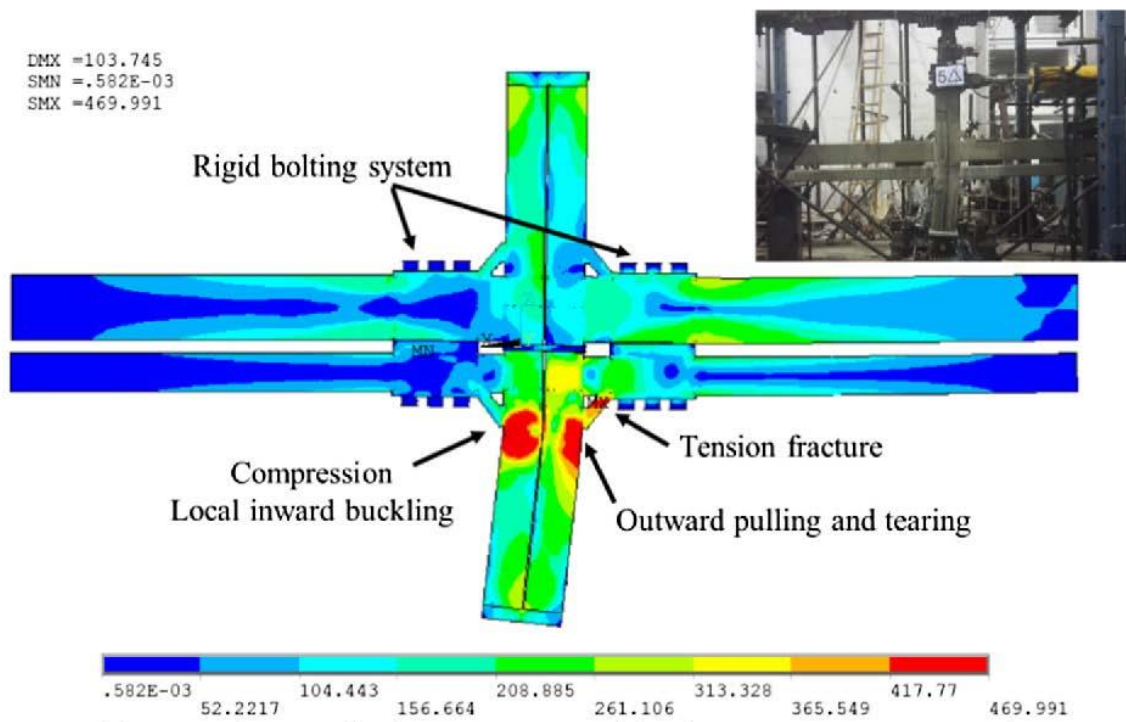


במאמר מתוארת סדרת ניסויים בקנ"מ של 2:3 על מחברים שמטעמי סימטריה מייצגים מחצית מחבר, כלומר מחברים 2 עמודים ו-4 קורות כמוצג באיור המצוטט להלן:



(a) Specimen types

הניסוי כלל שני סוגי מחברים: עם ובלי רכיבי הקשחה משולשיים. בשני ניסויים הופעלה העמסה מונוטונית בכיוון אחד עד להתפתחות שבר במחבר עצמו. בשני ניסויים הופעלה עמיסה קוואזי-סטטית מחזורית שכללה שניים עד שלושה מחזורי העמסה (לשני הכיוונים). בנוסף נערכה אנליזה למחבר באמצעות תוכנת האלמנטים הסופיים ANSYS. המודל האנליטי מוצג באיור המצוטט להלן:



(a) Negative 5Δ displacement state (displacement at -103.7 mm)

מתוצאות הניסויים והאנליזה עולה כי למחבר המוצע יתרון ניכר ביחס למחברים קלאסיים לחיבור יחידות מודולריות בשל פשטות ההרכבה ויכולת הגישה למחבר בעיקר בצמתים פנימיים של המבנה.

בכל הניסויים הכשל הופיע באזור המחבר ולא מחוץ לו, אולם גם כאשר המחבר כשל לא נגרם אובדן יציבות לצומת כולו.

תוספת המקשיחים האלכסוניים אמנם מעלה את החוזק ואת הקשיחות אולם היא מקטינה את היכולת לספוג אנרגיה ובסופו של דבר לאחר מספר מחזורי עמיסה יש ירידה משמעותית בחוזק ובקשיחות של הצומת כתוצאה מכשל של המקשיחים.

בסך הכל הקשיחות והחוזק הסכומיים של הצומת הינה כסכום הקשיחות והחוזק של הרכיבים הבודדים (קורות ועמודים) המתחברים אליו ולא קיים אפקט של "חיבור מרוכב" של אלמנטים.

Pham et al. 2017

המאמר מציג מסגרת כללית שתאפשר כתיבת תקנות, תקנים, מפרטים ורשימות בקרה על בסיס תפקודי באוסטרליה. זאת מכיוון שבנייה מודולרית שונה מבנייה קונבנציונלית במספר פרמטרים. קיימים שחקנים נוספים על השחקנים הרגילים של הבנייה הקונבנציונלית שהם המתכנן והמבצע.

הבנייה המודולרית צריכה להיות כפופה לרגולציה בשלושה תחומים: ייצור, בטיחות בעבודה (אין הכוונה לבטיחות בעבודה באתר בנייה אלא בטיחות במפעלי ייצור) והובלה.

ארבעת השלבים בבנייה המודולרית כוללים: ייצור, הנפה, הובלה והרכבה. בסוף התהליך המבנה המוגמר איננו מבנה זמני או מבנה יביל וחלות עליו כל הדרישות שחלות על מבנה קבע.

תנאי הסמך של המבנה משתנים במהלך כל שלביו ויש לקחת את כולם בחשבון. בכל שלב יש לבדוק את תסבולת המבנה או הרכיב כנגד ההטרחות של אותו שלב. הכוחות הפועלים על המבנה בשלבים השונים יכולים להיות שונים מאד מאשר בבנייה הקונבנציונלית. הכוחות הדינמיים הפועלים על היחידה בעת הובלתה תלויים משיטת ההובלה: במשאית הנעה בכביש, ברכבת או באנייה. כוחות הרוח להם חשופה היחידה הם לא רק הכוחות במצבה הסופי באתר הבנייה.

המאמר מפרט אילו תקנים אוסטרליים רלבנטיים לבנייה המודולרית ומתייחס לאותם נושאים שלא מכוסים בתקינה האוסטרלית בשל היות הבנייה המודולרית שיטת בנייה חדשה יחסית באוסטרליה.

בבנייה המודולרית המתכנן צריך כבר בתחילת התכנון לוודא מול היצרן מה הן יכולות הייצור שלו מבחינת ממדים ושיטות חיבור. בהיבט הכלכלי הפרמטר של חיסכון בחומר איננו יותר הפרמטר המוביל אלא ההתאמה של המודול הבסיסי לשימוש חוזר רב פעמי ככל שניתן.

רמת הדוקומנטציה הנדרשת בבנייה המודולרית היא הרבה יותר מפורטת מאשר בבנייה הרגילה. היא צריכה לכלול הוראות לכל ארבעת השלבים מהייצור ועד ההרכבה, הנחיות אחסון, פרוצדורות פיקוח בשלבים השונים כולל הגדרת אבני הדרך לפיקוח, רשימות חלקים מפורטות ועוד.

הממשק בין מודול למודול חייב להתחשב גם בחיבור הקונסטרוקטיבי וגם במעבר של מערכות מודול למודול.

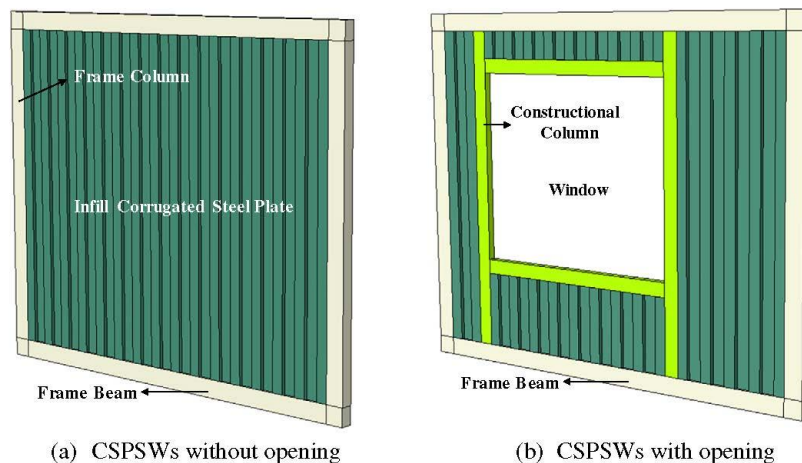
Ding et al. 2017

המאמר עוסק בהתנהגות הסיסמית של בנייה מודולרית מקונסטרוקצית פלדה עם מילוי של פח גלי (גל בחתך טרפזי). דוגמא לסוג הבנייה מתוארת באיור המצוטט להלן:



(a) Residential building

במסגרת המחקר נערכו חמישה ניסויים על קירות בגודל מלא (קנ"מ 1:1), הכוללים מסגרת פלדה (עמודים וקורות) עם מילוי פח גלי בעובי של 16 מ"מ. קיר אחד ללא פתחים, שני קירות עם פתחי חלונות, ושני קירות עם פתחי דלתות כמתואר באיור המצוטט להלן:



(a) CSPSWs without opening

(b) CSPSWs with opening

בחמשת הניסויים הופעל כוח אופקי מחזורי קוואזי-סטטי על הקירות בראשיהם, עם תזוזה אופקית המגיעה עד כדי 8 פעמים התזוזה האופקית המביאה את המערכת לכניעה. הופעלו עשרות מחזורים של עומס אופקי דו-כיווני עד לכשל. בחלק מהקירות מספר המחזורים הגיע עד כדי 55.

מניתוח תוצאות הניסויים עלו המסקנות הבאות:

המשיכות של הקיר ללא פתח הגיעה עד כדי 15. המשיכות של הקירות עם הפתחים הגיעה לערכים של 2.7 עד 4.5.

הקשיחות של הקיר ללא פתח היא הגבוהה ביותר אולם עם התקדמות מחזורי העמיסה היא נופלת יחסית באופן יותר דרמטי מאשר בקירות עם פתחים וזאת בשל קריסה גלובלית של פח המילוי.

ספיגת האנרגיה של מרבית הקירות עם פתח גבוהה יותר מספיגת האנרגיה של הקיר ללא פתח שמציג באופן הבולט ביותר תופעה של pinching בהיסטרזות של העמיסה.

החוזק של הקירות עם פתח קטן יחסית (חלון) גבוה יותר מאשר החוזק של הקיר שאין בו פתח – בשל הקריסה הגלובלית של קיר המילוי.

אופן הכשל של קיר ללא פתח תחת כוח אופקי בראש הקיר מתואר באיור המצוטט להלן:



(a) Residual deformation

אופן הכשל של קיר עם פתח תחת כוח אופקי בראש הקיר מתואר באיור המצוטט להלן:



(c) Tension strip

Lacey et al. 2018

המחברים סוקרים את מצב הידע הקיים כיום בעולם בכל הקשור להיבטים המבניים של מבנים מודולריים. המייחד את קבוצת מבנים זו הוא בנייה של יחידות נפחיות, מחומרים שונים, במפעל מרוחק מאתר הבנייה – הובלתם של היחידות לאתר והרכבתם באתר באמצעות מחברים. מיון של מבנים אלה לפי חומרים מצביע על שלוש קטגוריות עיקריות: פלדה, בטון טרום ועץ. מבני הפלדה המודולריים מתחלקים לשלוש תת קטגוריות: מודולים מפלדת מבנים רגילים (Modular Steel Building), מודולים מפלדה קלה (דקת דופן) ומבני מכולות. בנייה נושאת של מודולים מפלדה קלה (דקת דופן) קיימת למבנים בגובה של עד עשר קומות. מעל גובה זה נעשה שימוש בפלדת מבנים רגילה המשמשת כשלד עיקרי נושא.

מה שמייחד את המבנים המודולריים ממבנים רגילים הם המחברים של המודולים. גם הם מתחלקים לשלושה סוגים עיקריים: מחברים לחיבור פנימי של הרכיבים בתוך המודולים, מחברים לחיבורים אופקיים ואנכיים בין מודולים למודולים, ומחברים לחיבור המודולים ליסודות. החיבור של מודול מעל מודול (או מודול ליד מודול) מייצר בדרך כלל מרווח מינימלי שמאפשר גישה חיצונית אל המחברים שהם בד"כ מחברי ברגים. המרווח גם משמש למעבר תשתיות.

המחברים סקרו 13 מבנים מודולריים שונים שהוקמו בעולם ובנייתם הושלמה בין השנים 2001 - 2017. הבניין שבנייתו הושלמה בשנת 2001 הוקם במנצ'סטר באנגליה, משמש למעונות סטודנטים והוא בן 9 קומות. הגבוה בבניינים שנסקרו הוא בנין משולב משרדים/מגורים, גובהו 57 קומות ובנייתו הושלמה בסין בשנת 2015.

המחברים דנים באספקטים מבניים רבים והם:

הובלה – בעת ההובלה המבנים נחשפים לתאוצות גבוהות. יש לתכנן את נקודת ההנפה שלהם ולוודא שבעת הנפתם הדפורמציות שהם עוברים מוגבלות בעיקר כדי למנוע סדיקה של אלמנטים רגישים שמורכבים בתוכם.

כוחות רוח – העומסים הדינמיים של הרוח מתאפיינים בתדרים נמוכים שנעים בין 0.01 ל-2.5 הרץ. מקובל לתכנן את המבנים כך שההסטה הקומתית האופקית לא תעלה על 1/500 והתזוזה האופקית הכוללת בראש המבנה לא תעלה על 1/600 ביחס לגובה המבנה. המבנים מתחילים להיות רגישים לאפקטים דינמיים של הרוח כאשר תמירות עולה על 1/5 וכאשר התדר העצמי שלהם נמוך מ-1 הרץ שמאפיין מבנים מודולריים בני 10 קומות (גובה של 30 מ') ויותר. נערכו מעט מאד מחקרים בתחום של התנהגות מבנים מודולריים לרוח. באותם מחקרים שנערכו נצפה סוג המחברים (קשיחים, קשיחים למחצה או ללא מחברים כלל) כגורם משמעותי המשפיע על התנהגות המבנה.

גופים נישאים ברוח – בזמן סופת רוח עלולים לפגוע במבנה חלקים ושברים הנישאים באוויר כתוצאה מעוצמת הרוח. בשל היותם של המבנים המודולריים קלים עם מעטפות מבנה קלות הפגיעה של גופים אלה במבנה יכולה לגרום לנזקים משמעותיים.

רעידת אדמה – מעט מאד מחקר נערך בתחום זה על מבנים מודולריים. המחקר המועט שנערך מתייחס בעיקר למבנים מודולריים (MSB) ממסגרות פלדה עם אלמנטי הקשחה (Braced Frames) בני 2-6 קומות. מבנים אלה מתאפיינים בכך שהמוד הראשון של התנודה הוא הדומיננטי שבהם והנזק (התפתחות פרקים פלסטיים) מתרחש בעמודים בקומה הראשונה שלהם. המבנים מתאפיינים בחוסר המשיכות של המחברים לחיבור אנכי בין המודולים וכתוצאה מכך בחוסר יכולת של המבנה לבצע רדיסטרביציה של העומסים לאחר שרכיבי ההקשחה מגיעים לכניעה.

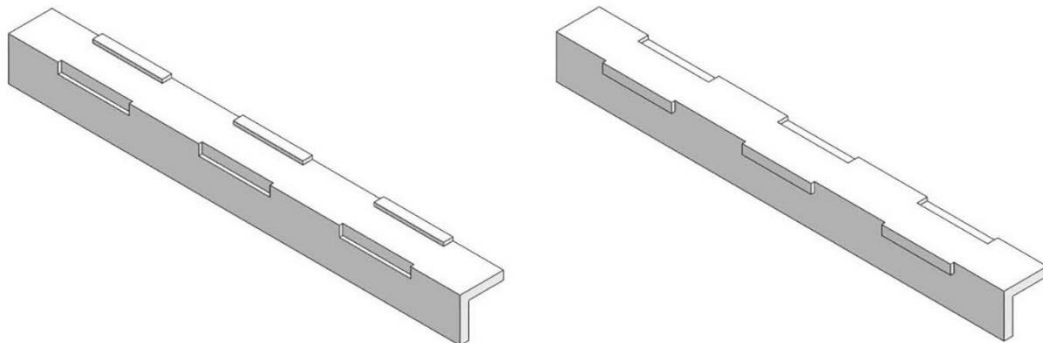
עומסי הדף – פגיעה מפיצוץ קרוב יכולה לגרום לכשל מקומי של רכיבים וכתוצאה מכך להתמוטטות בשרשרת. מבחינת ההתנהגות הגלובלית של המבנה לעומסי הדף, קיימים מבנים מודולריים ייעודיים אשר קירותיהם עשויים מכריך מלוחות פלדה. עובי פחי הפלדה נע בין 3.2 ל-7.9 מ"מ והם מרותכים לשלד הפלדה הנושאת.

כשל בשרשרת – ההתמודדות עם כשל בשרשרת נעשית על ידי הגדלת משיכות המבנה ועל ידי תכנון נתיבים חלופיים למעבר עומסים. המחברים מתארים ניסוי שנערך על מבנה מכולות תלת קומתי אשר לגביו נערכה סימולציה ממוחשבת של פגיעה באחד העמודים וכן נערך ניסוי פיצוץ בסמוך לחזית המבנה אשר אותו המבנה שרד מבלי לאבד יציבות גלובלית.

עמידות באש – חלק מהבעייתיות של המבנים המודולריים לעמידות באש הם המרווחים האינהרנטיים בין המודולים שהם חלק משיטת הבנייה. מרווחים אלה משמשים נתיבים נוחים להתפשטותה של האש. רגישות נוספת לאש קיימת לאור השימוש שנעשה בבנייה המודולרית בחומרים פולימריים מרוכבים (אמנם לא כחלק מהשלד הנושא אלא אלמנטים מחפים של המבנה). לחומרים אלה יש עמידות מאד מוגבלת לאש ונעשו ניסיונות לשימוש במעכבי בעירה כדי לשפר את עמידותם.

Sharafi et al. 2018

המחברים מתארים מחבר נעילה חדש שפותח על ידם (ואשר נרשם עליו פטנט) לחיבור יחידות מודולריות במבנה קומות. צורת מחבר הנעילה מתוארת באיור להלן המצוטט מהמאמר.

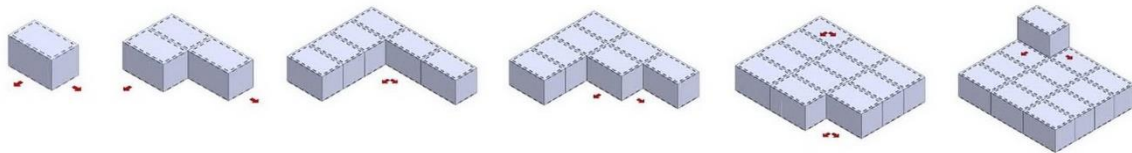


המחבר מבוסס על בליטות ומגרעות הננעלות זו בזו. למחבר זה יתרונות נוספים מלבד פונקציית הנעילה. הוא מאפשר להתגבר על אי דיוקים בייצור ובהרכבה ולמעשה שומר על כך שמבנה הקומות המוקם יהיה ורטיקלי וממזער את הסטיות המצטברות.

יחד עם זאת, תפקידו העיקרי של המחבר הוא העברת הכוחות המתפתחים בין המודולים בעיקר כתוצאה מהכוחות האופקיים הפועלים על המבנה (למשל כתוצאה מרוח או רעידת אדמה). בנוסף מחברי הנעילה מסייעים ליצירת נתיבי עומס חלופיים למניעת כשל בשרשרת.

המחברים וודאו את יעילות המחברים שפותחו על ידם גם באמצעות סימולציות נומריות וגם באמצעות ניסויים על מודלים בקנ"מ 1:20 על גבי שולחן רעידה. דרכי הבדיקה החישוביות והניסוייות כללו בין היתר גם בחינת המבנה לעומסים אופקיים הפועלים עליו וגם בדיקת עמידותו כנגד התמוטטות בשרשרת וזאת על ידי השמטה של מודולים.

הרכבת המבנה תוך שימוש במחברי הנעילה המוצעים מחייבת סדר הרכבה מוכתב כמתואר באיור המצוטט להלן.



Liu, Yan, et al. 2018

המחברים מציגים מבנה מלון בן 30 קומות שנבנה בסין במשך חודשיים בלבד תוך שימוש ביחידות מודולריות עשויות מפרופילי פלדת קונסטרוקציה בחוזק גבוה (חוזק כניעה 345 מגפ"ס) עם חיבורים באתר באמצעות ברגים דרוכים מפלדה מסוג 8.8.

העמודים מסודרים במודולים של 3.9x3.9 מ'. גובה כל קומה 3.3 מ' ובסה"כ גובה המבנה הוא 99 מ'. העמודים מפרופילים חלולים ריבועיים במידת חתך של 200/200 מ"מ מחוזקים בפחים שטוחים כמתואר באיור המצוטט להלן.

לעמודים מחוברים אלכסוני חיזוק קצרים המקשיחים את צומת החיבור שבין העמוד לבין המסבך הנסמך עליו. שלד התקרה כולל מסבכים ראשיים, מסבכים משניים ועליהם סיפון (Deck) מסוג "פלקס-דק" כלומר פח צורני ועליו בטון יצוק. המודולים מגיעים לאתר כאשר הם כוללים כבר את כל עבודות הגמר כולל מעברי צנרות וגופי תאורה, במודול התקרה, אך לא קירות וחומרי גמר. מודול לדוגמא (כולל הרכבתו באתר) מוצג באיור המצוטט להלן. החיבורים באתר של מודול למודול מבוצעים כאמור באמצעות ברגים דרוכים בחוזק 8.8.



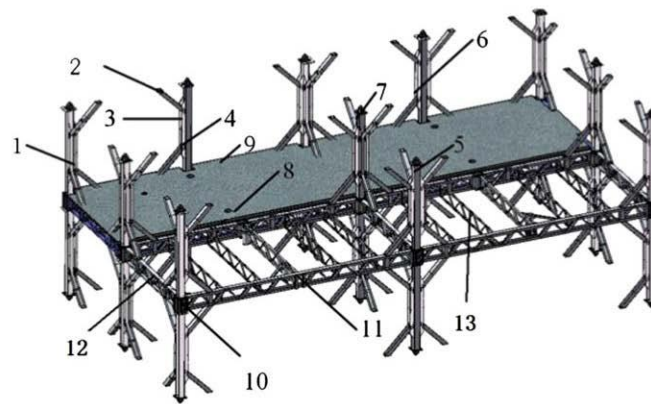
המחברים מדגימים תכנון מלא של שלד המבנה. מודגמת האנליזה לכוחות גרביטציוניים, רוח ורעידות אדמה על פי הדרישות בתקינה הסינית הרלבנטית. יצוין כי בשונה מהתקינה המערבית, בתקינה הסינית קיימים שני מצבי עמיסה עיקריים לרעידת אדמה: מצב ראשון עבור רעידות אדמה שכיחות שם מתחייב שילוב עומסים של רוח ורעידת אדמה. מצב שני עבור רעידות אדמה נדירות (בדומה לתקינה בעולם המערבי) שם עומסי הרוח אינם משולבים עם עומסי רעידת האדמה. האנליזה בוצעה בארבעה כלים חישוביים כדי לוודא שאין טעות חישובית: ANSYS, ETABS, SAP2000, MIDAS. אנליזה לרעידות אדמה בוצעה בשלוש גישות: אנליזה מודלית (אלסטית לינארית) על פי ספקטרום תגובה, אנליזה אלסטית ליניארית דינמית (Time History) על פי היסטוריה של שתי רעידות מוכרות מקליפורניה ועוד מספר סטים של רעידות סינטטיות, ואנליזת דחיפה סטטית לא-ליניארית (Push-Over).

החיבור של עמוד מעל עמוד חושב כחיבור קשיח (Rigid). החיבור של מסבך תקרה לעמוד חושב כחיבור קשיח למחצה (Semi-Rigid). בוצע מידול באמצעות קפיצים של החיבור בין העמוד למסבך המתחבר אליו, כאשר קשיחות הצומת לסיבוב נקבעה מתוך ניסויים.

התנהגות המבנה ברעידת אדמה, ככל שעולה מאנליזת הדחיפה, הינה כמעט כולה בתחום האלסטי ללא הצגת משיכות. אך למרות זאת המחברים מראים כי תכן המבנה עומד בדרישות התקן הסיני לרעידת אדמה. האלמנטים הראשונים שמגיעים לכשל הם אלכסוני המסבך ולאחר מכן חגורותיו.



(a)



Liu, He, et al 2018

בהמשך לחלקו הראשון של המאמר (שהדגים את התכן של מבנה המלון T30 שנבנה בסין), עוסק חלקו השני של המאמר בבחינת שלושת הטיפוסים העיקריים של המחברים, שבוצעו באתר בעת ההרכבה באמצעות ברגים דרוכים מפלדה 8.8, בפרויקט:

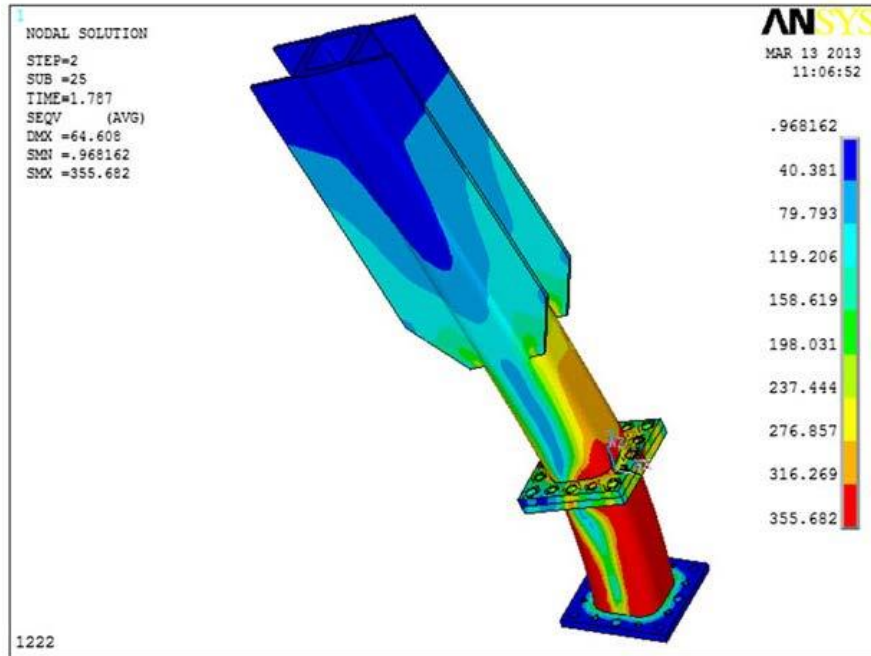
- מחבר עמוד לעמוד
- מחבר עמוד למסבך
- מחבר אלכסון חיזוק (Bracing) לחגורת המסבך

התסבולות של המחברים והקשיחויות שלהם נבדקו גם באמצעים אנליטיים (הרצות בתוכנת האלמנטים הסופיים ANSYS) ובאמצעות ניסויים בקנ"מ מלא של הצמתים.

באיור המצוטט מתואר המודל באלמנטים סופיים ששימש לאנליזה של מחבר עמוד לעמוד.

בניגוד לחלקו הראשון של המאמר שם בוצעה בין היתר אנליזה דינמית (Time History) אלסטית לינארית, בחלקו השני של המאמר בוצעה אותה אנליזה דינמית אך לא-לינארית, אלסטו-פלסטית באמצעות תוכנת האלמנטים הסופיים ANSYS. זאת כדי לתקף תוצאות שהתקבלו בחלקו הראשון של המאמר באמצעות אנליזת דחיפה (Push Over) סטטית אלסטו-פלסטית. אנליזת הדחיפה מביאה

בחשבון רק את שני המודים הראשונים (אחד בכל כוון X או Y) ומתעלמת מההשפעות של המודים הגבוהים ואילו האנליזה הדינמית (Time History) לוקחת בחשבון גם את המודים הגבוהים.



באיורים הבאים מתוארים הניסויים שבוצעו בשלושת טיפוסים המחרבים:



(c) Segment 1 connection before loading



(d) Segment 1 connection failure mode

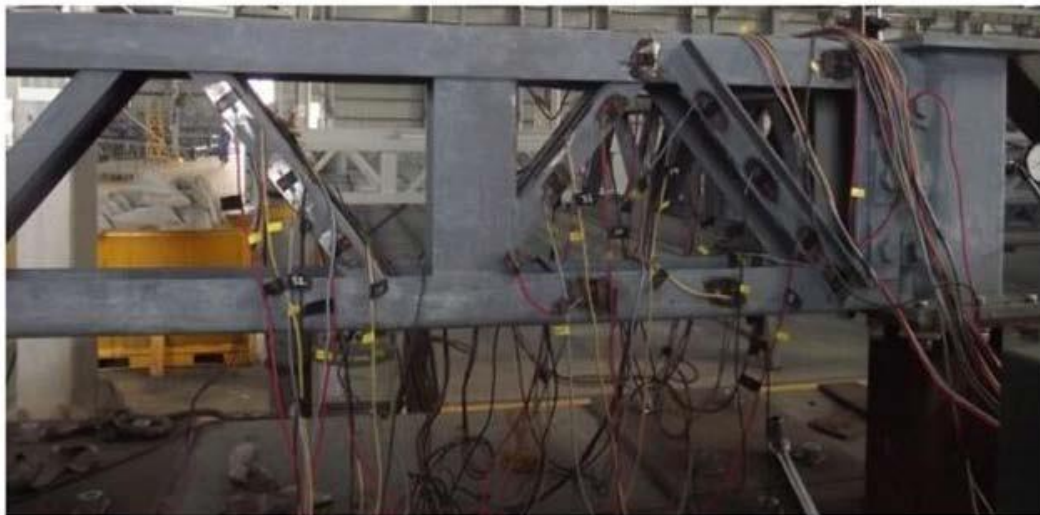
ניסוי בקנ"מ 1:1 של הטרחת מחבר ברגים עמוד לעמוד בכוחות אופקיים



(a) Frame test setup

(b) Truss failure mode in bending and shear

ניסוי בקנ"מ 1:1 של הטרחת מחבר ברגים אלכסון לחגורת מסבך בכוחות אופקיים



ניסוי בקנ"מ 1:1 של הטרחת מחבר ברגים עמוד למסבך בכוחות אופקיים

מתוך האנליזות שבוצעו עלה שבמספר מקומות בודדים במבנה, התסבולת של מחברי הברגים של עמוד לעמוד הייתה נמוכה מההטרחה. המחברים מדווחים שבאותם מקומות חוזקו המחברים באמצעות ריתוכים ולא באמצעות הוספת ברגים (לא היה מספיק מקום להוספת ברגים) ולא באמצעות הגדלת הברגים המתוכננים אשר הספיקו בקוטרם למרביתם של החיבורים.

ניסוי של בדיקת קשיחות (מומנט-סיבוב) מחבר מסבך עמוד הינו מומלץ לפני כל תכן של מבנה מסוג זה מכיוון שלא ניתן להעריך את הקשיחות האמורה באופן אנליטי בשל מורכבות המחבר.

המחברים הגיעו למסקנה שבסוג זה של מבנים לא ניתן להסתפק באנליזת דחיפה סטטית לא לינארית אלא יש הכרח לבצע אנליזה דינמית מלאה (Time History) לא-לינארית אלסטו-פלסטית.

בעוד שניתן לראות במחבר עמוד לעמוד (המבוצע באמצעות ברגים ואוגנים Flange to Flange connection) כמחבר קשיח באופן מלא, הרי ששני המחברים האחרים (המבוצעים באמצעות ברגים) של עמוד לחגורת מסבך, וחיזוק אלכסוני לחגורת מסבך הינם מחברים קשיחים למחצה.

א-4.1. מראי מקום

- Annan, C.D., Youssef, M.A., El-Naggar, M.H., 2008, "Effect of Directly Welded Stringer-to-Beam Connections on the Analysis and Design of Modular Steel Building Floors". *Advances in Structural Engineering* Vol. 12 No. 3 2009, p373-383.
- Chen Z., Liu J., and Yu U., 2017, "Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings", *Engineering Structures*, Vol. 147, 2017, pp. 625-638
- Deng E.F., Yan J.B., et. Al., Ding Y., Zong L., Li Z.X. and Dai X.M., 2017, "Analytical and Numerical Studies on Steel Columns with Novel Connections in Modular Construction", *Int. J. of Steel Structures*, Vol. 17, No. 4, 2017, pp. 1613-1626.
- Ding Y., Deng E.F., Zong L., Dai X.M., Lou N. and Chen U., 2017, "Cyclic Tests on Corrugated Steel Plate Shear Walls with Openings in Modularized-Constructions", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 138, 2017, pp. 675-691.
- Fathieh, A., Mercan, O., 2014, "Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Analysis of Modular Steel Buildings" *Structural Congress 2014 ASCE*, p2466-2477.
- Franke, S., Hausammann, R., 2013, "A modular timber construction system made with ribbed-box or rather hollow-box elements". *Structures and Architecture: Concepts, Applications and Challenges – Cruz (ed)*, Taylor & Francis Group, London, p2232-2239.
- Gunawardena, T., Ngoa, T., Mendis, P., 2016, "Behaviour of Multi-Storey Prefabricated Modular Buildings under seismic loads". *Earthquakes and Structures*, Vol. 11, No. 6 (2016) 1061-1076.
- Ha, T.H., Cho, B.H., Kim, H., Kim, D.J., 2016, "Development of an Efficient Steel Beam Section for Modular Construction Based on Six-Sigma". *Advances in Materials Science and Engineering Volume 2016*.
- Kim, J., Jung, M., "Progressive collapse-resisting capacity of modular mega-frame buildings". *THE STRUCTURAL DESIGN OF TALL AND SPECIAL BUILDINGS*, *Struct. Design Tall Spec. Build.* 22, p471-484.
- Lacey A.W., Chen W., Hao H. and Bi K., 2018, "Structural Response of Modular Buildings – An Overview", *Journal of Building Engineering*, Vol 16, 2018, pp. 45-56.

- Lawson, R.M., Odgen, R.G., Pedreschi, R., Grubb, P.J., Popo-Ola, S.O., 2005, "Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction". *The Structural Engineer* – 99 Month 2005, P1-8.
- Lawson, P.M., Byfield, M.P., Popo-Ola, S.O., Grubb, P.J., 2008, "Robustness of light steel frames and modular construction". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings* 161 February 2008 Issue SB1, p3-16.
- Lawson, R.M., Richards, J., 2010, "Modular design for high-rise buildings". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures and Buildings* 163 June 2010 Issue SB3, p151–164.
- Li G.Q, Kao K., Lu Y. and Jiang J., "Effective Length Factor of Columns in Non-Sway Modular Steel Buildings", *Advanced Steel Construction*, Vol 13, No. 4, 2017, pp. 412-426.
- Liu X., Yan J.B., Zhou, X., Zhang A., Tian C and Zhang X., 2018, "Design and Compilation of Specifications for a Modular-Prefabricated High-Rise Steel Frame Structure with Diagonal Braces. Part I: Integral Structural Design", *Struct. Design Tall Spec Build*, 2018;27; e1415.
- Liu X., He X., Zhang A., Tian C Zhang X. and Tan Y., 2018, "Design and Specification Compilation of a Modular-Prefabricated High-Rise Steel Frame Structure with Diagonal Braces. Part II: Elastic-Plastic Time-History Analysis and Joint Design", *Struct. Design Tall Spec Build*, 2018;27; e1414.
- Pham L., GAD E., and Hargroves K., 2017, "Performance Framework for Modular Construction", *Mechanics of Structures and Materials: Advancements and Challenges*, Hao and Zhang (Editors) 2017, pp. 789-792.
- Sharafi P., Samali B., Ronagh H. and Ghodrati M., 2017, "Automated Spatial Design of Multi-Story Modular Buildings Using a Unified Matrix Method", *Automation in Construction*, Vol 82, 2017, pp. 31-42.
- Sharafi P., Mortazavi M., Samali B. and Rohagh H., 2018, "Interlocking System for Enhancing the Integrity of Multi-Storey Modular Buildings", *Automation in Construction*, Vol 85, 2018; pp. 263-272.
- Shirokova, W.S., Kholopova, I.S., Solovejv, A.V., 2016, "Determination of the frequency of natural vibrations of a modular building". *Procedia Engineering* 153 (2016) 655 – 661.

Ye Z., Wu G., 2017, "Optimal Lateral Aseismic Performance Analysis of Mega-Substructure System with Modularized Scondary Structures", Struct Design Tall Spec Build, Vol 16, 2017; 26:e1387.

א-5. שיטות בנייה והיבטים טכנולוגיים של היחידות

בעולם קיימים מספר מפעלים גדולים לייצור יחידות תלת ממדיות. חלק מהחברות עוסק לא רק בייצור היחידות אלא גם בשינוען לאתר והרכבתן בבניין. בדרך כלל המפעל עובד בשיטת בנייה ייחודית לו המבוססת על חומרי בנייה וטכנולוגיה עם פרטי מבנה ובניין שחוזרים על עצמם בכל הפרויקטים. לחלק משיטות הבנייה של יצרני היחידות המודולריות יש מסמכים ואישורים של גופי בדיקה, כגון BBA, המפרטים את פרטי הבנייה של השיטה בפירוט רב. לעומת זאת, לאחרות המידע בספרות מוגבל או שאינו קיים כלל. רק לחלק מהחברות אתר אינטרנט הכולל מידע טכני ברור ומפורט.

רשימת היצרנים העוסקים בבנייה גבוהה כוללת:

חברת הבנייה האירופאית Elements-Europe:

<http://elements-europe.com/about/>

חברת הבנייה הבריטית VisionModular:

<http://www.visionmodular.com/about/>

http://www.bbacerts.co.uk/your-search-results/?search_type=cert&keywords=14%2F5125&src=s

חברת הבנייה האמריקאית FutureForm:

<http://futureformglobal.com/>

חברת הבנייה האמריקאית OS:

<https://factoryos.com/>

<https://insights.globalspec.com/article/7611/why-prefabricated-construction-is-changing-the-world>

חברת הבנייה האוסטרלית UB – Unitised Building:

<http://www.unitisedbuilding.com/projects/>

חברת הבנייה הפולנית PolCom:

<http://www.polcommodular.com/>

חברת הבנייה הפולנית DMD modular:

<http://dmdmodular.com/>

הסקירה להלן כוללת רק מקורות שניתן היה לרכז מתוכם מידע טכני בעל ערך:

[חברת Vision Modular Systems UK Ltd.](#)

על פי מסמך האגרמנט של החברה:

http://www.bbacerts.co.uk/your-search-results/?search_type=cert&keywords=14%2F5125&src=s

לשיטה זו אגרמנט (אישור) של גוף הבדיקה הבריטי BBA, שמספרו 14/5125, המתאר את השיטה בפירוט רב.

החברה מייצרת יחידות מוגמרות בקווי ייצור מבוקרים במפעל עם רמת אוטומציה גבוהה. בקרת האיכות מבוצעת במפעל לפני העברת היחידות לאתר. החברה מובילה את היחידות ומרכיבה אותן בעצמה. היחידות מבוססות על שלד מפלדה מגולוונת עם רצפות מבטון. חיבורים במפעל הם בריתוך בעוד שהחיבורים באתר הם בהברגה. השיטה נועדה לבנייני מגורים, בתי מלון ומעונות סטודנטים.

החברה מעורבת בתכנון מתחילת הפרויקט ומאפשרת התאמה לדרישות הלקוח במגבלות של מידות מקסימליות של היחידות. גובה מקסימלי מומלץ ע"י החברה בשלב זה הוא 19 קומות.

מידות היחידות הן: אורך 8.7 עד 11.1 מ', רוחב 3.3 עד 4.5 מ', גובה 2.85 עד 3.6 מ'.

הדגמה של חתכים אופייניים של קירות היחידה ופרטי החיבור בין היחידות נתונה בשרטוטים להלן המועתקים ממסמך האגרמנט. המסמך כולל פרטים רבים נוספים והשרטוטים שכאן הם להדגמה בלבד.

Figure 2 Internal separating loadbearing wall detail

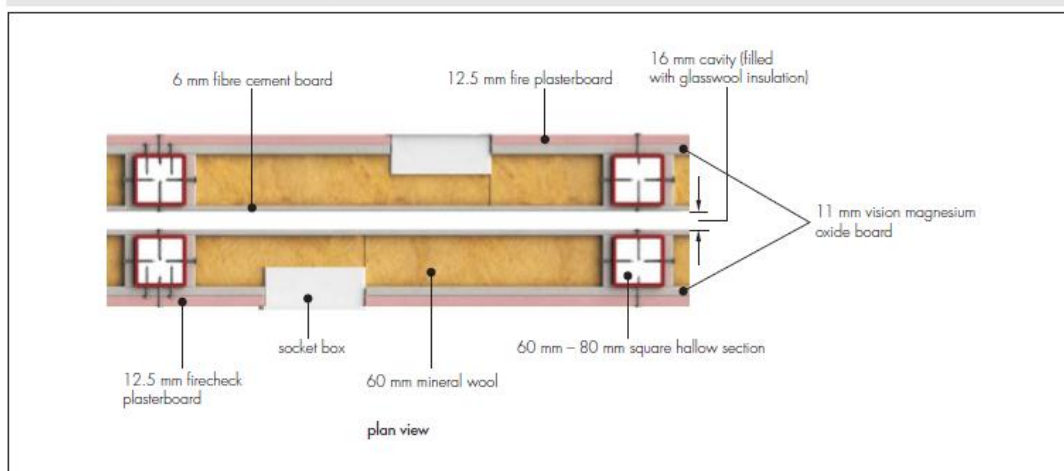
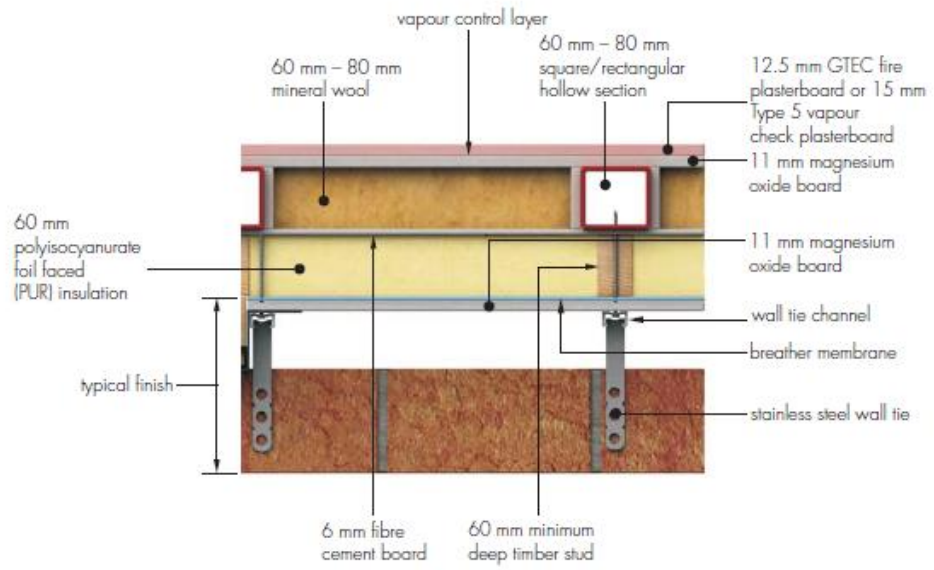
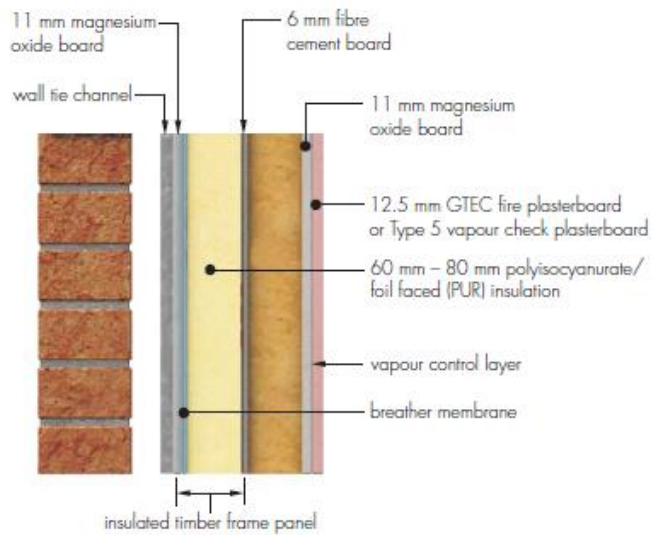


Figure 1 External loadbearing wall detail



plan view



side view

Figure 3 Ceiling detail

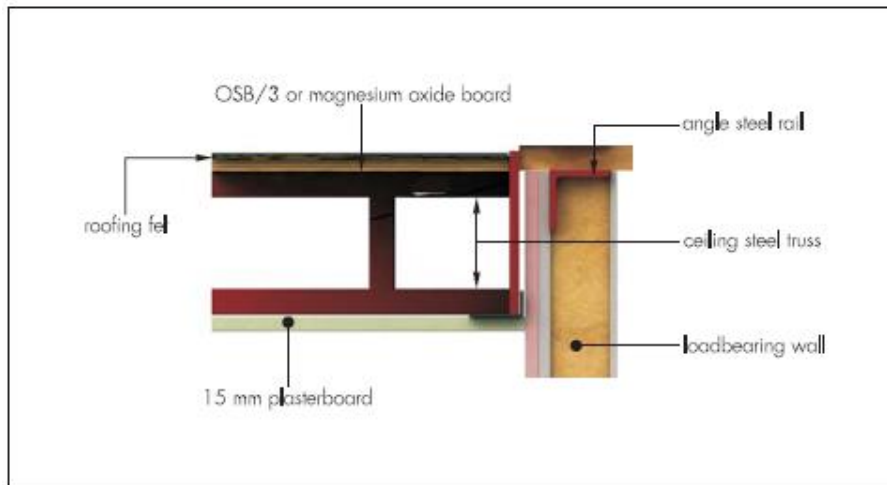
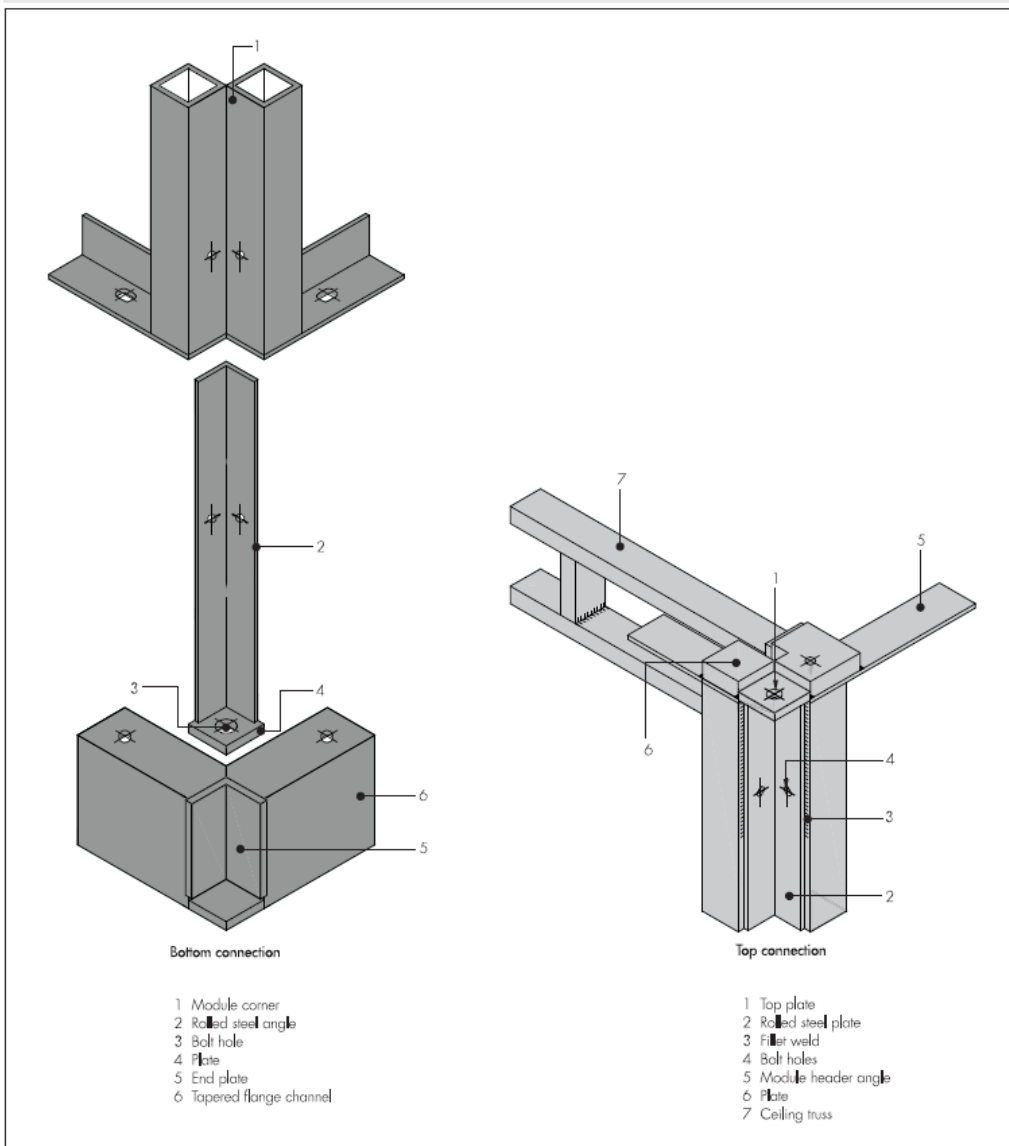


Figure 4 Module connection details



<http://elements-europe.com/about/>

חברת בת בקבוצה הבינלאומית The Pickstock Group. לחברה מפעל בשטח של 200,000 רגל מרובע במערב מידלנד שבבריטניה. החברה מייצרת את כל המרכיבים, החל בייצור רכיבי הפלדה עד לאספקה של היחידות המוגמרות אתר הבנייה. בתום הייצור כל יחידה עוברת בקרת איכות מלאה להבטיח שבוצעה כהלכה מבחינת המרכיבים והטולרנסים, ובהתאם לדרישות הלקוח.

הניסיון העיקרי של החברה מתמקד בבנייני מגורים להשכרה, בתי מלון, מעונות סטודנטים, בתי אבות סיעודיים, ובנייה לצבא ולמשטרה.

החברה מעורבת בתכנון הבניין מלכתחילה, ובעיקר בתיאום בין התכנון האדריכלי לפריסת היחידות ומידותיהן. כל יחידה מתוכננת בהתאם לדרישות הלקוח.

היחידות מבוססות על שלד ממסגרות קלות מפרופילי פח פלדה מעוצב בקר. החתכים האופייניים המיוצרים ע"י החברה הם חתכי C בגבהים של 70, 100 ו-150 מ"מ ועובי דופן של 1.2 ו-1.6 מ"מ. החברה מייצרת יחידות של חדרים בהם היא מאפשרת גמישות מלאה של התאמה לדרישות הלקוח מבחינת חומרי הגמר, ריהוט מובנה, ואביזרי חשמל ותקשורת. המבנה הסטנדרטי מאפשר עמידות אש של 90 דקות ולפי דרישה ערכים גבוהים יותר. כמו כן החברה מייצרת יחידות של חדרי מדרגות, חדרי רחצה, חדרי מטבח, וחדרי מערכות, כאשר בכלם קיימת האפשרות להתאמה מלאה של התכנון הפנימי לדרישות הלקוח. בחלק מהפרויקטים היחידות עצמן נושאות והחברה בנתה לעיתים את כל הפרויקט, ובחלק אחר הן הותקנו על מבנה נושא שנבנה ע"י הקבלן הראשי. החברה מייצרת גם אלמנטים מתועשים משלימים עבור גג הבניין. כמו כן היא מייצרת אלמנטי חזית, אותם ניתן להתקין כחזיתות בבנייה שאינה בהכרח מתועשת.

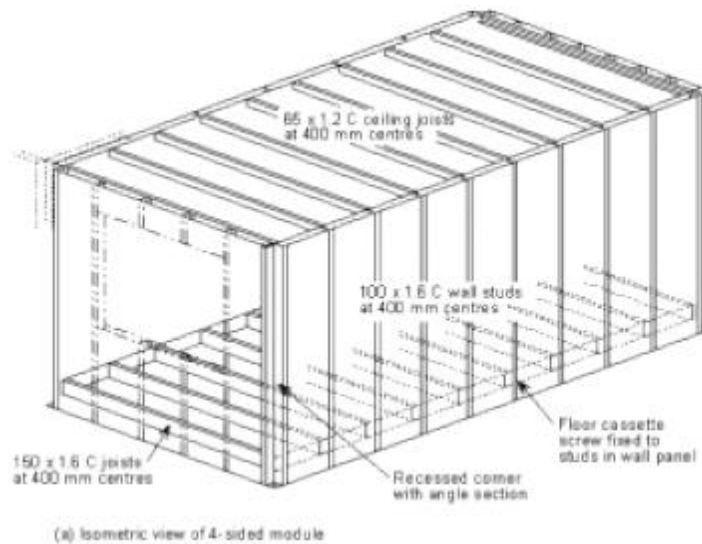
מאתר החברה לא ברור האם היחידות כוללות את החזית הסופית, או שזו מורכבת בנפרד בתום ההקמה של כל הבניין.

Steel Construction.info 2018

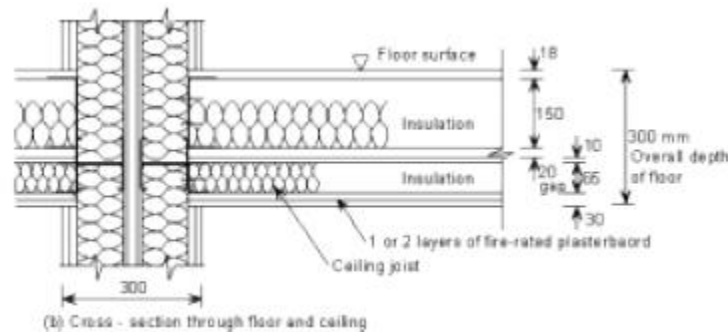
המסמך כולל תחילה הסבר מפורט ומקיף על מהות הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות מיוצרות במפעל ממבנה פלדה, ולאחר מכן מציג פרטי ביצוע טכנולוגיים. הנתונים הם בדרך כלל עבור יחידות ברוב של 3.6 מ' ואורך של 8.0 מ' בהן המבנה מבוסס על קירות נושאים. הזקיפים בקירות הם בדרך כלל מפרופילים דקי דופן מעורגלים בקר טיפוס C עם גובה דופן של 150-75 מ"מ. קורות הרצפה הן גם כן מפרופילי C כנ"ל, אך גובה הדופן גדול יותר: כאשר הקירות האורכיים הם הנושאים, הגובה הוא 250-150 מ"מ, וכאשר הקירות הקצרים הם הנושאים (כאשר מעוניינים ליצור פתחים

גדולים בקיר הארוך), הגובה הוא 250-400 מ"מ. ליצירת פתחים גדולים אפשר גם להוסיף עמודים מפרופיל חלול (SHS) המשתלבים בעובי הקיר.

בניית היחידות כוללת בשלב ראשון בניית הרכיבים המישוריים של הרצפה והקירות, ולאחר מכן הרכבתם בהברגה. במפגשי הפינה מוסיפים פרופילי זווית לצורך ההרמה ושיפור היציבות, כמודגם בתמונה המצוטטת:



מזרני הבידוד האקוסטי ו/או התרמי מותקנים במרווחים שבין הזקיפים והקורות, כמודגם בשרטוט המצוטט:



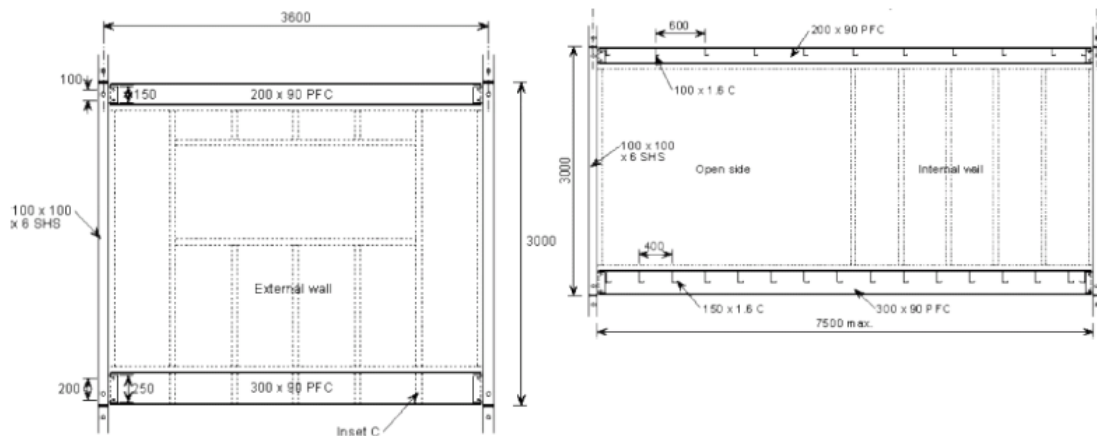
במעטפת יש צורך להוסיף בידוד תרמי חיצוני נוסף לצורך הביטול של הגשרים התרמיים הנובעים מרכיבי הפלדה.

לדעת המחברים, בנייה מודולרית המבוססת על יחידות תלת ממדיות בלבד (ללא קונסטרוקציה נוספת) מתאימה לבניינים בני עד 10 קומות לכל היותר, כתלות בעומסי הרוח (עומס רעידות אדמה אינו מוזכר). העברת הכוחות האנכיים היא בדרך כלל באמצעות הקירות הארוכים, שחייבים לעבור מקומה לקומה באותו המישור לכל גובה הבניין.

לבנייה עד כ- 6 קומות ניתן לדעת המחברים לבסס את היציבות האופקית על הקשחות במישורי הקירות באמצעות סרטי פלדה או לוחות חיפוי הפועלים כדיאפרגמות ועל המחברים בין היחידות (בדרך כלל בפינות). לבניינים בני 6 עד 10 קומות מוסיפים בדרך כלל מערכת הקשחה אנכית סביב גרעין מרכזי עם תקרות מוקשחות במסדרון שבין היחידות. לבניינים גבוהים יותר הקומות התחתונות מבוצעות כפודיום עליו נישאת מערכת היחידות, המחוברת אל גרעין מרכזי קשיח.

המחברים מבחינים בין בנייה עם 3 סוגי יחידות תלת ממדיות: יחידות הכוללות 4 קירות נושאים, יחידות עם קירות פתוחים חלקית, יחידות עם קירות פתוחים ועמודי פינה, לבין בנייה עם יחידות תלת ממדיות משולבות עם יחידות מישוריות של רצפות וקירות.

בבנייה עם פתחים גדולים בקירות כוללים עמודים בפינות או במקומות אחרים, אך בכל מקרה קורות השפה גבוהות יותר מקורות המשנה של הרצפה והתקרה, כאשר חתכים עקרוניים מוצגים בשרטוט המצוטט:

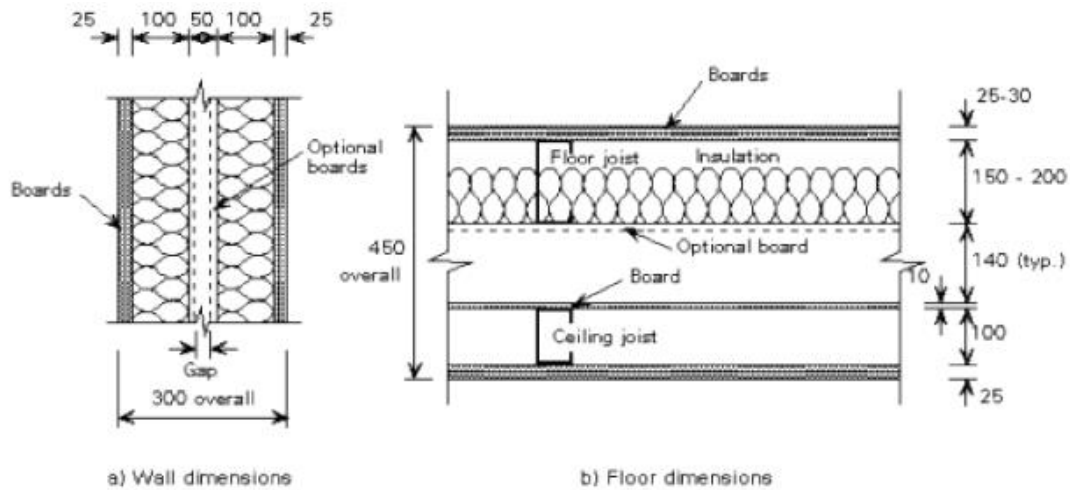


כאשר הרצפה כוללת שכבת בטון יצוקה לבקרת תנודות, כפי שנדרש בדרך כלל במבנים רפואיים, מסגרת הפלדה היא מפרופילים מעורגלים בחם.

בבנייה המערבת יחידות תלת ממדיות ויחידות מישוריות, היחידות התלת ממדיות מרוחקות זו מזו. יחידות הרצפה המישוריות נשענות עליהן ומשלימות את הרצפות, ויחידות הקירות מחוברים אליהן ומשלימים את סגירת החללים.

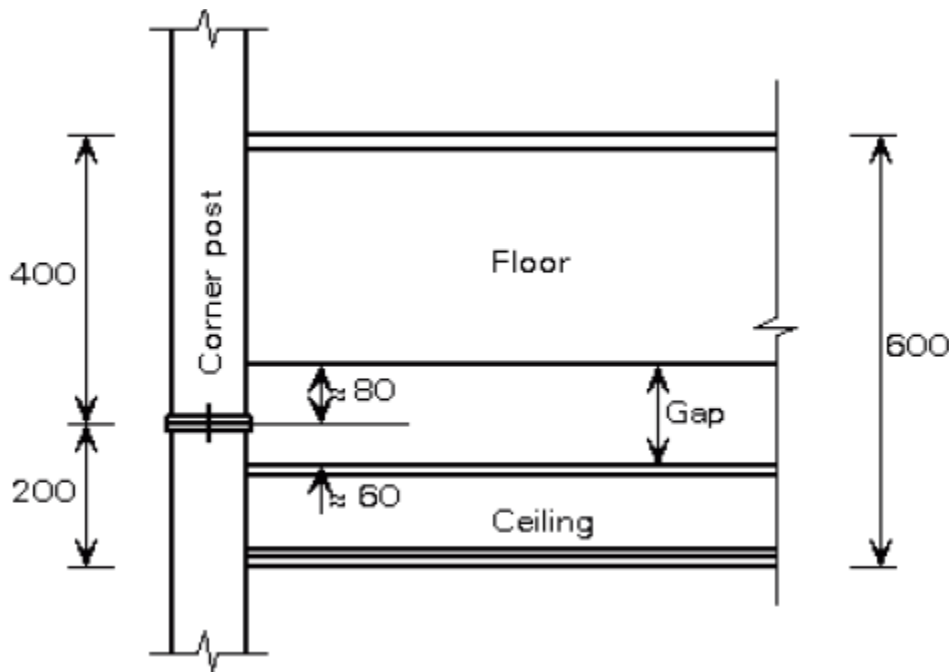
מודגמים במסמך גם שימושים מיוחדים, כגון: יחידות של מהלכי מדרגות, יחידות חדרי רחצה לא נושאות, ויחידות מרפסת.

חתכים אופייניים עבור בנייה עם קירות נושאים מודגמים בשרטוט המצוטט:



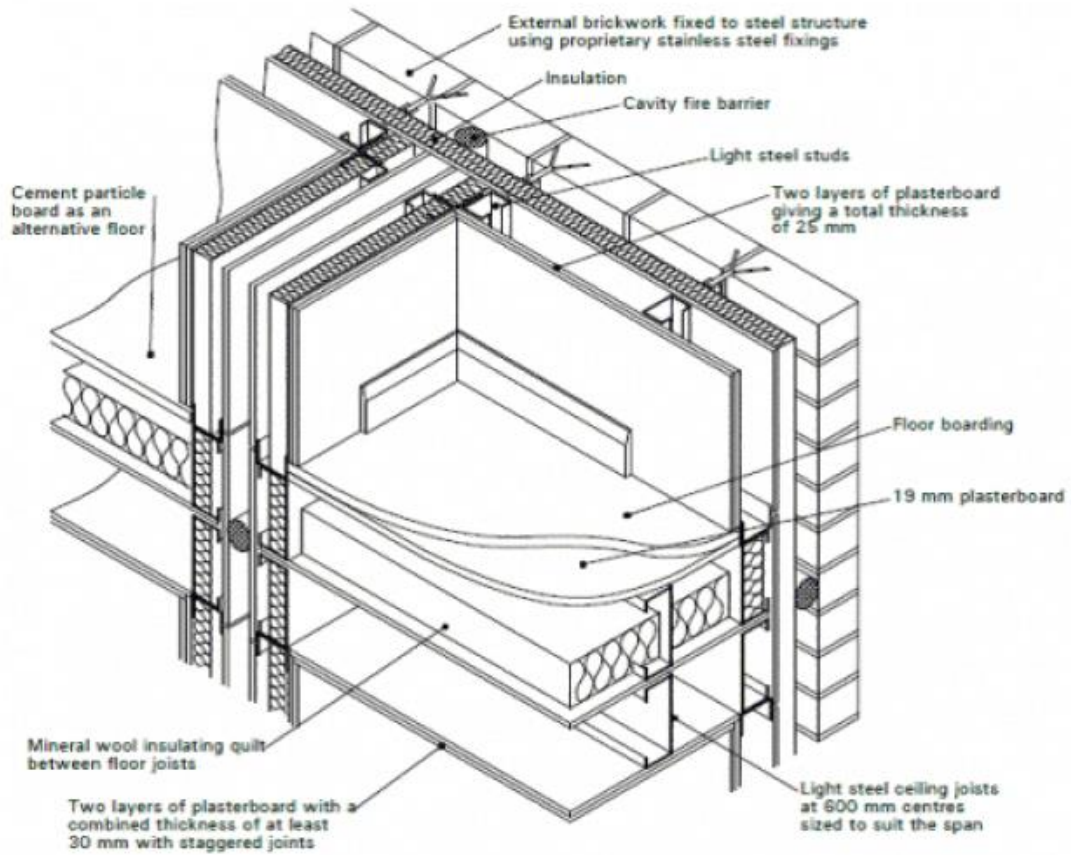
Typical wall and floor/ceiling dimensions

כאשר בקירות היחידות פתחים גדולים ולכן הן כוללות עמודים להעברת העומס האנכי, החתכים האופייניים הם לפי השרטוט המצוטט:



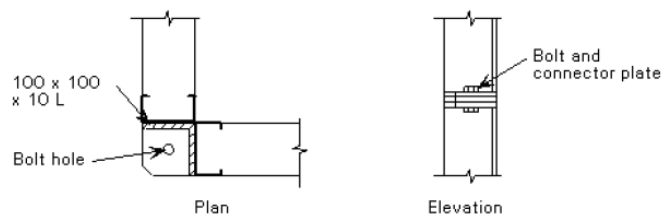
המסמך מדגיש את הצורך בהגנה אקוסטית במקומות שקיימות חדירות של צנרת תברואה, ומערכות חשמל ותקשורת. ההגנה נעשית בדרך כלל על ידי צמר מינרלי שממלא את המרווחים ומקטין את הסיכון למעבר קול עוקף דרך מרווחי אוויר רציפים.

המסמך מתייחס גם לפרטים הנוגעים לבטיחות אש. עמידות האש הנדרשת מושגת בדרך כלל באמצעות לוחות החיפוי, כאשר עובי השכבות ומספרן נקבעים בהתאם לתכונות הלוח. המסמך מציג פרטים סכמתיים של מחסומי האש האופייניים הנדרשים במרווחים הרציפים במפלסי התקרות, והמחסומים האנכיים במעטפת של מדורי אש, כמודגם בשרטוט המצוטט:

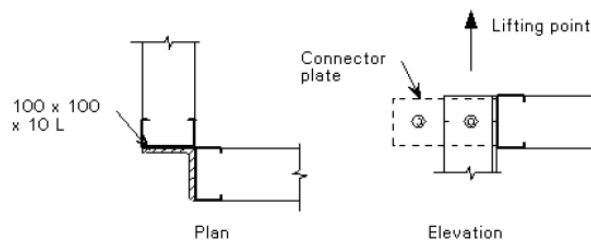


Compartment floor at junction with external wall and compartment wall

פרק מיוחד במסמך מוקדש למחברים. הדגמה של שימוש בפרופיל זווית מעורגל בחם לצורך הייצוב של הפינות ויצירת המחברים בין יחידות הכוללות קירות נושאים מוצגת בשרטוט המצוטט:



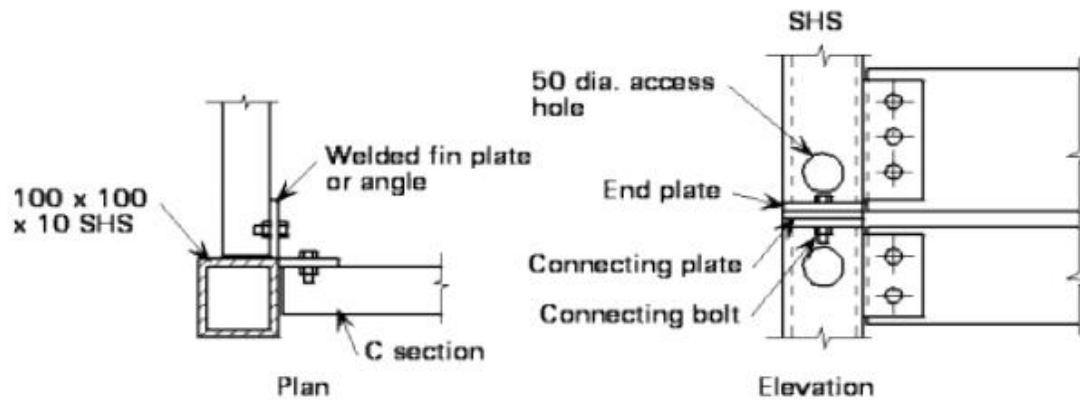
(a) Re-entrant corner with bolted end plate



(b) Re-entrant corner with welded nut

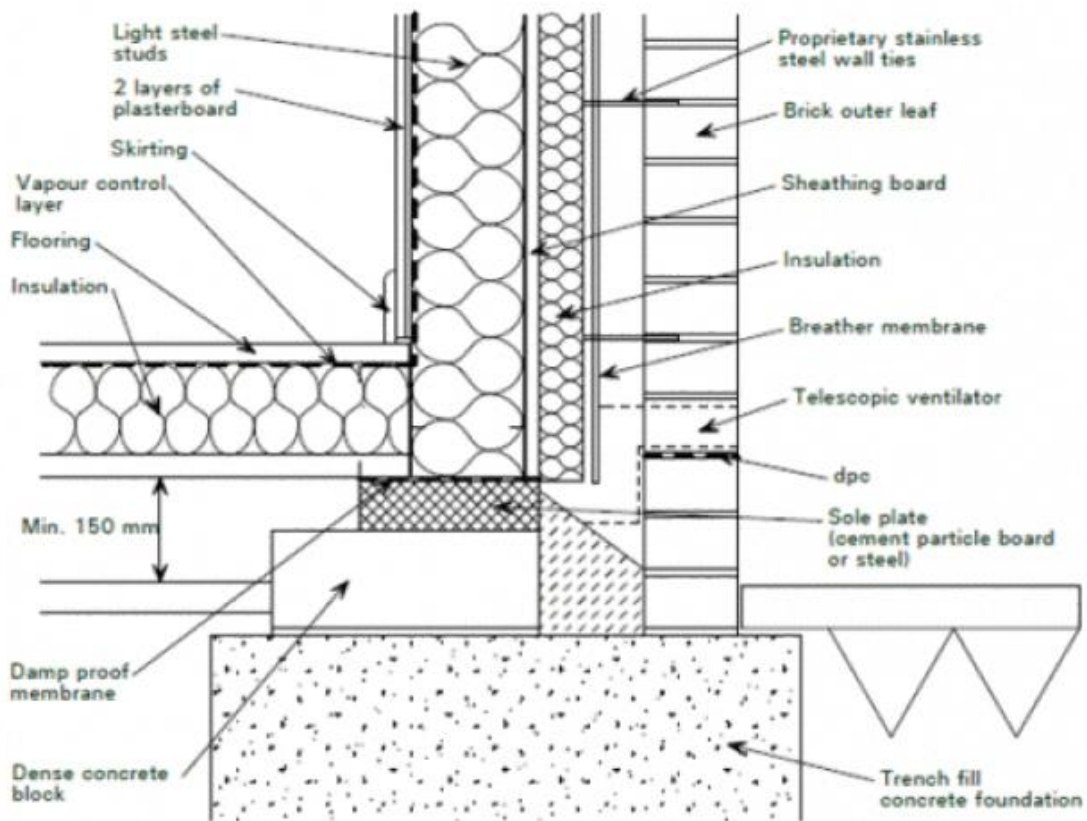
Corner posts using hot rolled steel [angles](#)

פרט חיבור ביחידות עם עמודי SHS בפינות מודגם בשרטוט המצוטט:



Corner post using [SHS](#) or special sections

הדגמה של פן המפגש של יחידת המחופה בלבנים עם קורות מסד נתון בשרטוט המצוטט:



Typical trench-fill foundation detail for masonry cladding

א-5.1. מראי מקום

Elements Europe Company, 2019, <http://elements-europe.com/about/>

Steel Construction.info, 2018, "Modular Construction". The free encyclopedia for UK steel construction information.

https://www.steelconstruction.info/Modular_construction

Vision Modular systems, 2014, http://www.bbacerts.co.uk/your-search-results/?search_type=cert&keywords=14%2F5125&src=s

א-6. היבטים של תפקוד פיסי וקיימות

Lawson et al 2010

מאמר זה מרכז מידע ממחקרים קודמים בנוגע לקיים של מבנים הבנויים מפרופילים מפח פלדה מגולוון מעוצב בקר. היות שמרבית הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות מבוססת על קונסטרוקציה מרכיבים כאלה, הממצאים במאמר זה רלוונטיים לנושא המחקר אף על פי שהמאמר לא עוסק ישירות בבנייה כזו.

המאמר מתייחס לפלדה העומדת בדרישות התקן הבריטי (BSI, 2004) BS EN 10326 ולגלובן באבץ המאפשר פסיבציה כימית וחסיונות בפני קורוזיה עקב נזק מקומי מרוכז לשכבת הגלובן (כגון שריטות דקות). נתוני הקיים במאמר לוקחים בחשבון שהבידוד התרמי של אלמנטי מעטפת (כגון קירות חוץ, גג וכד') הוא חיצוני ומבטיח שרכיבי הפלדה יהיו בצד החם ולא ייחשפו לרטיבות (כתוצאה מעיבוי חבוי), וכי מערכת האיטום מתוכננת ומבוצעת כהלכה כך שרכיבי הפלדה אינם חשופים למים זורמים או נקווים (כתוצאה מחדירת מים).

המחברים מציגים את הטבלה הבאה עבור הפחתת עובי הגלובן כתלות בסביבה, ומדגישים כי בגלל הקטנת ריכוז דו תחמוצת הגופרית באוויר שחלה בשנים האחרונות באוויר החוץ, הערכים העכשוויים פחתו והם יקטנו עוד יותר עם המשך המגמה הנ"ל. יחד עם זאת, אין עדיין נתונים חדשים בספרות.

Environment			Corrosivity of environment	Average reduction in coating thickness: $\mu\text{m}/\text{year}$
C1	Interior:	Dry	Very low	0-1
C2	Interior:	Occasional condensation	Low	0-1-0-7
	Exterior:	Inland and rural		
C3	Interior:	High humidity, some air pollution	Medium	0-7-2-0
	Exterior:	Industrial and urban inland or mild coastal		
C4	Interior:	Swimming pools, chemical plants, etc.	High	2-0-4-0
	Exterior:	Industrial inland or urban coastal (chloride-rich environment)		
C5	Interior:	Industrial with high humidity or high salinity coastal	Very high	4-0-8-0
	Exterior:			

Table 2. Performance of zinc coatings in different environments

המאמר מתייחס לשתי קטגוריות של אלמנטים, כאשר קטגוריה A, אלמנטים חבויים שלא ניתן לבדוק ולתקן את מערכת הגלובן שלהם, היא זו המתאימה למערכת הנושאת בבנייה מודולרית. קובע את אורך החיים למטרות תכן של הגלובן על פי הקריטריון של הפחתת עובי הגלובן ב-50%.

מתאר מספר מחקרי שדה שבוצעו בבריטניה לבחינת העמידות בפני קורוזיה של בנייה עם פרופילים מפח מגולוון מעוצב בקר.

במחקר שבחן אלמנטים שנחשפו לסביבה ב-15 בתים במנצ'סטר, ובמקביל נבדקו בתנאי מעבדה, ההתנהגות הטובה ביותר נצפתה ברכיבים מגולוונים בחם ומצופים בכרום (הקטנת עובי אחרי 3 שנים של 0.47 גרם למ"ר = 0.034 מיקרומטר). ההתנהגות הגרועה ביותר נצפתה ברכיבים עם גלובן אלקטרוני (הקטנת עובי אחרי 3 שנים של 7 גרם למ"ר = 0.51 מיקרומטר). כמו כן, רכיבים ללא ציפוי

כרום תפקדו הרבה יותר טוב מאלה שעם גלוון אלקטרוני (הקטנת עובי אחרי 3 שנים של 1.24 גרם למ"ר = 0.09 מיקרומטר). בכל המקרים קצב הפחתת העובי פחת עם הזמן.

במחקר שני שבחן אלמנטים בבניין בן 15 שנה באולטנווד, נצפתה הקטנת עובי קטנה מאוד באלמנטים שלא נחשפו לרטיבות (פחות מ- 0.2 גרם למ"ר לשנה, שהם פחות מ- 0.015 מיקרומטר לשנה), בעוד שבאלמנטים בתחתית מרתף שהיו חשופים לרטיבות הקטנת העובי הגיעה לכ- 1.22 גרם למ"ר לשנה (= 0.09 מיקרומטר לשנה), שהוא עדיין קצב משוער מזערי עבור רכיבים בתנאים יבשים לפי הטבלה למעלה, המבטיח אורך חיים ארוך במיוחד.

במחקר שלישי נבדקו אלמנטי חיפוי חיצוניים על גבי שני בניינים שנבנו באדינבורג בשנים 1994 ו- 1996 ודגמים יושמו מאחוריהם לאורך תקופה ארוכה. בבניין אחד יושמו דגמים מגולוונים בטבילה חמה (275 גרם למ"ר = 20 מיקרומטר) ללא ועם ציפוי כרום, ובשני דגמים עם גלוון באבץ ועם גלוון בהיתך של אבץ עם אלומיניום. משך המחקר היה מעל 10 שנים. במקרה ללא ציפוי כרום נצפתה הפחתת עובי ממוצעת של 0.43 גרם למ"ר לשנה (= 0.03 מיקרומטר לשנה) בבניין אחד ו- 0.3 גרם למ"ר (= 0.022 מיקרומטר לשנה) בבניין השני, והתנהגות די ליניארית לאורך הזמן. במקרה עם ציפוי כרום ההפחתה הממוצעת הייתה 0.3 גרם למ"ר לשנה, כאשר קצב ההפחתה הולך ופוחת עם הזמן, ובמקרה של הגלוון בנתך אבץ עם אלומיניום קצב ההפחתה היה 0.6 גרם למ"ר (= 0.044 מיקרומטר לשנה).

במקרה הרביעי נבדקה התנהגות של דגמים שיושמו במקומות שונים בבניין מגורי סטודנטים לאורך 10 שנים. במקום הלח ביותר (מתחת לרצפה התחתונה) קצב הפחתת עובי הגלבון היה 0.3 גרם למ"ר לשנה (= 0.022 מיקרומטר לשנה) שמוליך לאורך חיים תכנוני של 200 שנה.

במקרה החמישי נבדק הקיים במבנה שנבנה ביורק בשנת 1998 בשיטת הבנייה המודולרית עם יחידות תלת ממדיות. בוצעו בדיקות של אלמנטי הבניין עצמו וכן של דגמים שיושמו במקומות שונים. באלמנטי הבניין נצפתה הפחתת עובי שלא עלתה בשום מקום על 0.3 גרם למ"ר לשנה. עם זאת, בדגמים שיושמו במקומות לחים נצפתה הפחתה בשיעור ניכר יחסית: מתחת לרצפה התחתונה 0.5 עד 2.1 גרם למ"ר לשנה (= 0.036 עד 0.15 מיקרומטר לשנה) ומתחת לחלון 0.9 גרם למ"ר לשנה (= 0.065 מיקרומטר לשנה). לדעת המחבר תנאי הלחות המוגדלים שנמדדו במקומות אלה מוסברים על ידי בידוד בלתי מספיק.

על סמך מחקרים אלה המחבר מסיק שאורך החיים התכנוני של גילבון באבץ חם בשיעור 275 גרם למ"ר (20 מיקרומטר) מאפשר אורך חיים תכנוני של כ- 230 שנה בתנאים יבשים של אלמנטי בניין, 100 שנה בגג מבודד כהלכה, 60 שנה בגג שאינו מבודד, כ- 60 עד 180 שנה בחיפויי קיר כתלות ברמת הלחות המתמדת לה נחשפים הרכיבים, וכ- 50 עד 100 שנה ברצפה תחתונה כתלות ברמת הלחות השוררת בה.

Zahharov et al 2010

מתאר מקרה של בנייה מודולרית בשלבים, החל משנת 1992 עד סוף 1993 של בניין מעבדות במפעל פרמצבטי שכלל בסופו של דבר 3 קומות בשטח של 420 מ"ר בכל קומה. מעבר לתהליך ההגדלה שבוצע בקלות ובמהירות רבה, הבניין הוזז ממקומו רבע פעמים בהתאם לצרכים של המפעל. כל הפעולות נעשו במהירות וללא פחת ופסולות ובמינימום הפרעות לסביבה. מעבר לתיאור ההתרחשויות המאמר לא כולל מדדים כמותיים. ההערכה של המחברים היא שבכל העברה של הבניין נחסכו כמיליון אירו.

Quale et al 2012

המאמר מציג השוואת LCA בין אינדקס ההשפעה על הסביבה ("מעריסה לקבר") של בנייה קונבנציונלית באתר לעומת בנייה מודולרית. הבחינה נעשתה עבור בניין מגורים נמוך בן שתי קומות בשטח כולל של 186 מ"ר, הממוקם במרכז החוף המזרחי בארה"ב. עבור הבנייה הקונבנציונלית נלקחה בחשבון שיטת הבנייה בעץ המקובלת בארה"ב. עבור הבנייה המודולרית הניחו החוקרים שהבניין מבוצע מארבע יחידות מוגמרות לחלוטין במפעל, המבוצעות גם כן מקונסטרוקציה עץ. החוקרים הניחו שמרחקי הובלה של חומרים הם כ-30 מייל, ומרחקי הובלה של היחידות המודולריות כ-300 מייל. הבחינה בוצעה עבור נתונים שהתקבלו מחמישה קבלנים העובדים בשיטות קונבנציונליות ושלושה מפעלים לבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות. הבחינה כללה חישוב ההשפעה על ההתחממות הגלובלית באמצעות אינדקס דו תחמוצת הפחמן השקיל (באמצעות תוכנת SimaPro), וחישוב גורמי השפעה נוספים שאינם כלולים ב"ל (באמצעות BEES).

ההשפעה על התחממות גלובלית מוצגת בשרטוט המצוטט:

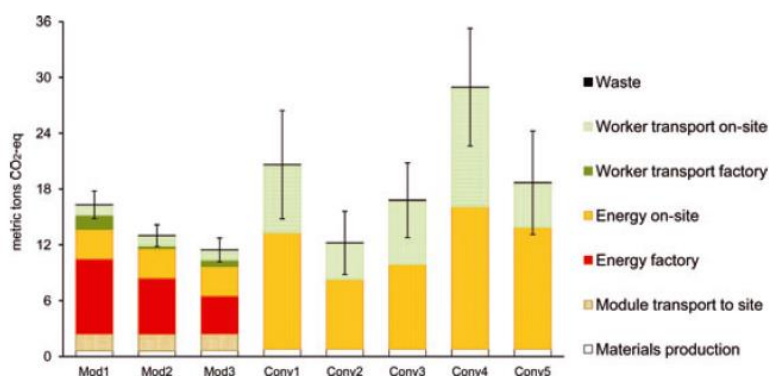


Figure 3 Global warming potential from modular (Mod) and conventional (Conv) construction cases of a 2,000 square foot residential home, in metric tons of carbon dioxide equivalents (CO₂-eq); differences in construction only.

באופן כללי הפליטות של גזי חממה בבנייה המודולרית עקב תצרוכת האנרגיה במפעל בתהליך הייצור גדולות יותר, אך נמוכות באופן ניכר עקב יתר הגורמים, ובמיוחד עקב השינוע של עובדים וחומרים. כמו כן, רמת אי הוודאות של הממצאים בבנייה המודולרית נמוכה מאוד לעומת הבנייה הקונבנציונלית.

בממוצע התקבל שההשפעה של בנייה קונבנציונלית על תהליך ההתחממות הגלובלית גבוהה בכ- 40% מזו של הבנייה המודולרית.

הגורמים הנוספים מבוטאים בטבלה המצוטטת להלן. במרבית ההיבטים התקבל יתרון לבנייה המודולרית, כאשר לבנייה הקונבנציונלית השפעה שלילית גדולה יותר בכ- 20% עד 70%.

Table 2 Average results from modular and on-site construction, BEES 4.02 impact assessment method (NIST 2007); rows may not sum due to rounding

	GHG emissions (kg CO ₂ -eq)	Acidification (kmol H ⁺)	Carcinogens (g benzene-eq)	Non-cancer (kg toluene-eq)	Criteria pollutants (10 ⁻⁶ DALYs)	Eutrophication (kg N-eq)	Ecotoxicity (kg 2,4-D-eq)	Smog (kg NO _x -eq)	Water (1000 L)	Ozone depletion (mg CFC-11-eq)
Modular average	13,600	5,010	22	47,820	1,290	55	33	83	18,400	229
Material production	613	230	1	3,640	191	4	3	4	1,130	21
Material transport to factory	10	3	<1	14	<1	<1	<1	<1	1	<1
Module transport to site	1,800	596	1	2,590	86	1	1	15	246	1
Factory energy use	6,070	1,870	13	28,200	566	40	15	17	13,900	25
On-site energy use	3,160	1,810	2	5,140	271	2	5	38	590	3
Worker transport to factory	831	193	2	2,990	61	3	4	3	1,010	71
Worker transport to site	1,110	305	3	5,290	107	5	5	6	1,560	108
Waste management	2	1	<1	3	7	<1	<1	<1	1	<1
On-site average	19,500	7,710	30	58,000	2,160	51	47	95	15,500	741
Material production	780	274	2	4,420	234	5	3	4	1,350	29
Material transport to factory	11	4	<1	16	1	<1	<1	<1	2	<1
Module transport to site	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Factory energy use	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
On-site energy use	11,500	5,470	6	19,400	1,240	12	13	54	4,010	17
Worker transport to factory	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Worker transport to site	7,160	1,960	22	34,220	689	34	31	37	10,100	695
Waste management	3	2	<1	5	11	<1	<1	<1	1	<1

Notes: GHG = greenhouse gases; CO₂-eq = carbon dioxide equivalent units; kmol H⁺ = 1,000 mole; H⁺ = protons; one mole of protons (mol H⁺); DALY = disability adjusted life-year; N = nitrogen; 2,4-D = 2,4-dichlorophenoxyacetic acid; NO_x = nitrogen oxides; CFC-11 = trichlorofluoromethane. One kilogram (kg, SI) = 10³ grams (g) = 10⁶ milligrams (mg) ≈ 2.204 pounds (lb); one liter (L) = 0.001 cubic meters (m³, SI) ≈ 0.264 gallons (gal).

MODCONS D5.1 2013

הדו"ח מציג תחילה את הדרישות להפרדה אקוסטית במספר מדינות באירופה, ולאחר מכן את הפרטים שמאפשרים תפקוד אקוסטי תקין של בנייה מודולרית קלה עם שלד פלדה.

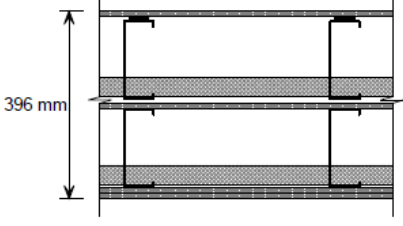
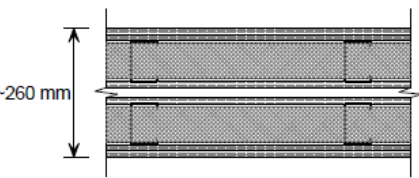
הכללים העיקריים המצוינים עבור קירות הם:

- קירות כפולים ללא חיבורים לגובה הקירות למעט החיבורים המבניים בין היחידות במפלסי התקרות.
- מסה מזערית של 22 ק"ג למ"ר בכל אחד משני הקירות.
- עובי מינימלי כולל של הקיר הכפול 200 מ"מ.
- איטום טוב ומלא של המישקים בין הלוחות במפעל.
- מזרונני צמר מינרלי בשני הקירות.
- לוחות הקשחה בצד החיצוני של קירות חוץ.
- שיפור נוסף באמצעות פרופילי תמיכה אופקיים מעל הזקיפים האנכיים לפני יישום לוחות הגבס הפנימיים.
- עטיפה מלאה מאחור בצמר מינרלי של אביזרי חשמל החודרים את לוחות הגבס, והימנעות מיישום אביזרים משני הצדדים של הקיר באותו מרווח בין הזקיפים.
- איטום משופר סביב מעברי צנרת וכד'.

עבור הפרדה של מכלולי תקרה-רצפה לקול נישא באוויר הכללים המצוינים דומים תוך הדגשת הצורך למנוע מעבר קול עקיף במפגשי רצפה קיר.

עבור הפרדה של מכלולי תקרה-רצפה לקול הולם מודגש הצורך בתשתית גמישה מתחת לריצוף ובהפרדת הרצפה הצפה מחלקי המבנה ברצפה ובקירות.

בדיקות שבוצעו עבור האלמנטים בשרטוט המצוטט:

<p>Separating floor and ceiling:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 18 mm flooring grade plywood • 3 mm isolation strip • 180 mm deep perimeter hot-rolled steel channel section with 165 mm light steel joists • 80 mm of fibre glass insulation between the joists • 150 mm deep perimeter hot-rolled steel channel section supporting 138 mm steel joists boarded with: • 9 mm OSB board underneath. 	 <p style="text-align: center;">396 mm</p> <p style="text-align: center;">Separating floor construction</p>
<p>Separating wall:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1 layer of 12.5 mm fire resistant plasterboard • 1 layer of 12.5 mm standard plasterboard • 80 mm light steel stud wall with 80 mm of glass fibre insulation between the C sections • 4 mm sheathing grade plywood • Cavity (30 to 50 mm wide) 	 <p style="text-align: center;">~260 mm</p> <p style="text-align: center;">Separating wall construction</p>

הראו את התוצאות:

Table 8: Typical acoustic performance data for modular construction

Element	Sound reduction	Measured for Modular Construction	Regulations Part E
Floor	Airborne	48 dB	$D_{nT,w} + C_{tr} \geq 45$ dB
Floor	Impact	54 dB	$L'_{nT,w} \leq 62$ dB
Wall	Airborne	47 dB	$D_{nT,w} + C_{tr} \geq 45$ dB

Lee et al 2014

במסגרת השאיפה לקדם בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות עבור בנייה גבוהה למגורים בקוריאה בוצעו הערכות תיאורטיות ונבדק כושר ההפרדה האקוסטי לקול הולם של מכלולי רצפה-תקרה טיפוסיים לבנייה בקוריאה. כל המכלולים שנבדקו כללו מערכת חימום רצפתי בשכבה העליונה ושכבת בטון בעובי 10 ס"מ כמערכת הנושאת של הרצפה. בתחום התדרים הנמוך, כושר ההפרדה היה דומה לזה של בנייה רגילה מבטון. בתחום התדרים מעל 125 הרץ התפקוד של הבנייה הרגילה מבטון היה טוב יותר.

MODCONS D4.1 2015

מקור זה הוא דו"ח מקיף מאוד (כ- 150 עמודים) של הקבוצה שטיפלה בנושא של קיימות במסגרת הפרויקט האירופאי MODCONS. נבחנו והשוו מספר מדדים כמותיים הרלוונטיים להיבטים של

קיימות ותכונות אחרות של שיטות בנייה שונות. ההשוואה בוצעה עבור בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות לעומת בנייה קונבנציונלית עם שלד בטון יצוק באתר וקירות מילוי מבלוקים. המסקנות העיקריות כוללות:

- עלות – הוזלה כוללת של כ- 5% עד 9%, הנובעת מהגורמים הבאים: 3% עד 6% בשל קיצור משך הפרויקט הכולל בכ- 6 חודשים, הקטנת עלות התכנון בכ- 2% בשל העברת חלק ניכר של התכנון למפעל, והפחתת עלויות תיקון שגיאות וליקויים באתר.
 - פריון – הפחתת כוח האדם באתר בכ- 50%. לפי הערכת המחברים הפריון באתר משופר פי 3 עד פי 4 מהבנייה הרגילה.
 - בטיחות – ההערכה היא של 100000 שעות עבודה הבטיחות בבנייה מודולרית גבוהה כפי שניים מהרגילה. בהתחשב בזירוז הביצוע ליחידת שטח, ההערכה היא שהבטיחות משופרת פי 3 עד 4 ליחידת שטח.
 - מהירות הביצוע – בבנייה מודולרית עם יחידות מוגמרות במפעל ללא קונסטרוקציה תומכת נוספת משך הפרויקט מתקצר בכ- 55% עד 65%. בבניינים בהם היחידות אינן נושאות ומונחות על מבנה עם תקרות בטון משך הפרויקט מתקצר בכ- 35% עד 45%.
 - ייצור פסולות – בבנייה רגילה הפסולות מהוות כ- 10% עד 15% מהחומר המגיע לאתר. בבנייה מודולרית הפסולות מופחתות בכ- 60% עד 95%.
 - השפעה על הסביבה – תנועת כוח אדם וחומרים אל ומהאתר מופחתת בכ- 60% וקיימת לאורך זמן קצר הרבה יותר, כך שההשפעה הסביבתית הכוללת היא כ- פי 3 יותר קטנה. כמו כן מופחתת תכולת הפחמן הגלומה מופחתת בכ- 20%.
 - אחריות חברתית – העבודה במפעל מקנה זכויות, יציבות ותנאי עבודה משופרים לעובדים. כמו כן, ההפרעה לסביבת האתר (הפרעה לתנועה, רעש, לכלוך ואבק) מופחתת באורח ניכר.
- הדו"ח כולל (בפרקים 4, 5, ו-6) סקירה תמציתית של ממצאים מעבודות קודמות אשר תרמו למסקנות הללו. נתונים כמותיים ניתן למצוא בעיקר בעבודות המפורטות בסעיפים 4.8, 4.10 (המתייחס למחקר של Quale 2012 שנסקר לעיל), ו- 4.11, ובאופן ייעודי לבנייה המודולרית (לאו דווקא תלת ממדית) במקרי הבוחן המפורטים בפרק 5 והנתונים המפורטים שנאספו ממספר פרויקטים כמפורט בפרק 6. טבלה 7.1 בדו"ח מסכמת את הממצאים הכמותיים שהחוקרים אספו.

Kamali and Hewage 2016

המאמר מרכז סקר ספרות מקיף (State of the Art Report) שבוצע על מנת לבחון א. את היתרונות והחסמים של בנייה מודולרית לעומת בנייה קונבנציונלית ו- ב. את רמת הקיימות של בנייה מודולרית לעומת בנייה קונבנציונלית. המחברים סקרו 94 מסמכים העוסקים בשני היבטים לעייל וסיכמו אותם בשני פרקים עיקריים של המאמר.

ממצאי המחקר העיקריים, כפי שהם מתקבלים סקר הספרות הנרחב של המחברים, מפרטים להלן.

א.1 יתרונות:

לוח זמנים – משכו הכולל של פרויקט מתקצר באורח ניכר. בבנייה שאינה גבוהה במיוחד מגיעים לקיצור של כ- 40% במשך השהייה באתר ולהפחתה ניכרת במשכו של תהליך התכנון. ככל שהבניין גבוה יותר הזמן הנחסך קטן יותר כי התכנון והביצוע נעשים בכל זאת מסובכים יותר, אך עדיין משך הפרויקט כולו קצר יותר באופן משמעותי.

עלות – באופן כללי בנייה מודולרית זולה יותר בכ- 10%. הגורמים העיקריים המשפיעים על ההוזלה כוללים: חיסכון של כ- 25% בעלות כוח אדם באתר, הזמנת חומרים בכמויות גדולות במפעל מאפשרת מחירי בסיס נמוכים יותר, חיסכון ניכר בהובלות לאתר מפחית עלויות הובלה, הגברת הפיריון באתר ובמפעל משפיעה על הפחתת העלות. מנגד קיימים גורמים המגדילים עלויות, כגון: עלות תכנון הנדסי גבוהה יותר, עלות שינוע לאתר של היחידות המודולריות. המחברים מדגישים שחלק ניכר של היתרונות של בנייה מודולרית (כגון, הגברת הבטיחות, שביעות הרצון ורווחת העובדים) אינם מקבלים בשלב זה ביטוי כמותי בבחינה הכלכלית הנהוגה.

בטיחות באתר – מציינים הפחתה של עד כ- 80% בתאונות אתר בזכות מעבר לבנייה מודולרית. הגורם העיקרי הוא הסטת מרבית העבודות, למעט הרכבה, למפעל בו העבודה נעשית במפלט של קומה אחת.

איכות המוצר – איכות המוצר גבוהה יותר בזכות העברת כל תהליך הייצור למפעל, בו הפעולות נעשות באופן מבוקר, מרביתו באמצעות מכשור ואוטומציה, כאשר גם העובדים עצמם מיומנים יותר בזכות ההתמחות הייעודית שלהם. כמו כן העבודה נעשית בתנאים מוגנים מפגעי מזג אוויר ולכן כמות השגיאות קטנה יותר.

כוח אדם ופיריון – כוח האדם הדרוש באתר יכול להיות פחות מיומן בשל פשטות העבודות. הפיריון באתר גדול יותר בשל אופי העבודות שהן מוגדרות ומאורגנות היטב ומראש וקל מאוד לפקח עליהן. במפעל הפיריון גדול במיוחד בזכות כוח האדם הקבוע, המיומן במשימותיו. פעילות מקבילה של עבודות שונות מתאפשרת ביחידות המבוצעות במפעל ללא הפרעה בין בעלי המקצוע השונים.

קיימות – הפחתת פסולות היא היתרון העיקרי שנובע מדיוק רב יותר ברכישת חומרים, חיתוכם ומחזורם. מאידך בנייה מודולרית צורכת למטרת הבנייה כ- 10% עד 15% יותר חומר (בגלל הכפלת קירות ורכיבי תקרה-רצפה). כמו כן, השפעת הבנייה המודולרית על הסביבה של אתר הבנייה מופחתת באורח ניכר הן בשל קיצור משך השהות באתר, והן בשל ביטול חלק ניכר של הפעולות שמעלות אבק וגורמות לרעש ולתנועת רכבים מוגברת לאתר (להובלת חומרים ופסולות, ציוד וכוח אדם).

א.2 חסרונות/חסמים/אתגרים:

תכנון הפרויקט – בנייה מודולרית מחייבת התייחסות תכנונית שונה לחלוטין מזו הנהוגה בבנייה הרגילה. תכנון הפרויקט חייב לקחת בחשבון מראש את הטכנולוגיה. תכנון היחידות חייב להיות קפדני

וגמור לפני תחילת הייצור ולקחת בחשבון גם את מצבי ההובלה וההרכבה, ואת פרטי הציבור בין היחידות, בין לבין מערכת הביסוס, וכן בין לבין קונסטרוקציה ראשית כאשר מדובר בבנייה גבוהה עם גרעין מרכזי ו/או עם מבנה הקשחה נוסף.

מגבלות הובלה – מגבלות סטטוטוריות לגבי תנאי הובלה בדרך מכתבים מידות מקסימום של היחידות. כמו כן יש לקחת בחשבון אילוצים הנובעים מתנאי הובלה מקומיים בכל פרויקט, בעיקר כשמדובר באתרים עירוניים באזורים צפופים עם דרכי גישה עם תנועה צפופה.

דעה קדומה בקרב הציבור – מסיבות של חוסר הבנה מקצועית לגבי הטכנולוגיות השכיחות של בנייה מודולרית, בנייני מגורים טרומים, ובעיקר אלה המבוססים על יחידות שלמות מיוצרות במפעל נתפסים על יד הציבור כנחותים וכדומים לקראוונים, מכולות, ובניינים יבילים (בארה"ב ל-Mobile Homes).

עלות כינון גבוהה בהקמת מפעל – כאשר כוח האדם בסביבה זול וזמין אין כדאיות בבנייה מודולרית. גם בתנאים בהם בנייה כזו כדאית, המחסום הוא עלות ההקמה של מפעל (קרקע, ציוד ורכישת ניסיון), לצד עקומת הלמידה ההתחלתית הנובעת ממחסור במהנדסים ואדריכלים בעלי ניסיון מספיק להבטחת ההצלחה במהירות.

תיאום וקישור – בפרויקטים של בנייה מודולרית יש חשיבות רבה יותר לתקשורת ותיאום של התכנון המפורט הן של המוצר הסופי (הבניין) והן של כל תהליכי הביצוע וההקמה. כל בעלי העניין (יזם, מהנדסים, אדריכלים, יצרן, ספקים וקבלנים) חייבים להיות מתואמים ומעורבים באורח הדוק הרבה יותר.

ב. קיימות ותפקוד במחזור החיים

ככל שהבניינים נעשים יעילים ועמידים יותר בשלבי השירות שלהם (מבחינת איכות וקיים החומרים, יעילות התפעול של המערכות, והקטנת תצרוכת האנרגיה לחימום תאורה וקירור), כך תרומת ההשפעה הסביבתית בשלבי הבנייה, צריכת האנרגיה בשלב הייצור והבנייה, ותרומת שלב סיום החיים של הבניין נעשים דומיננטיים יותר בהקשר להיבטי הקיימות של טכנולוגיות הבנייה.

בנושא הקיימות של בנייה מודולרית והשוואתה לבנייה רגילה המחברים מדגישים שיש בספרות רק מספר קטן של עבודות ולכן הם סוקרים את כל המסמכים שמצאו אחד אחד. רוב העבודות שנסקרו עסקו למעשה בהשוואה של בנייה נמוכה, ולרוב לא למגורים. חלק מהמחקרים שהם סקרו מנותחים גם בסקר הספרות הנוכחי בפרטנות. להלן הממצאים העיקריים הנוספים הנובעים מהסקירה של המחברים על פי עבודות שלא הגיעו לידינו:

חוקרים מקנדה מצאו שבנייה מודולרית מאפשרת הפחתה של כ- 43% בפליטות דו תחמוצת הפחמן השקיל בשל הקטנת הפעילות באתר והפחתה כוללת של נסיעות הרכבים מהסוגים השונים. מחקר אוסטרלי הגיע למסקנה שאף על פי שבנייה מודולרית מפלדה צורכת יותר אנרגיה לחימום ולקירור

מבנייה מבטון, סך כל ההשפעה הסביבתית שלה על פליטות גזי חממה עשויה להיות משופרת לעומת הבנייה הקונבנציונלית בשל ההקטנה באנרגיה הגלומה בשלבי החיים התחילי (ייצור) והסופי (מחזור).

Nguyen et al 2016

המחברים מתמקדים בבחינה תיאורטית של התכונות בזמן שריפה של חומרים מבוססי GFRP (glass fibre reinforced polymer) מושבחים על ידי ננו-חרסית לצורך הבנייה של יחידות תלת ממדיות בבנייה מודולרית. המחקר עוסק בעיקר בבחינה השוואתית של מספר שיטות לסימולציה מתמטית כדי לבחון את ההשפעה של תכולת 5% ננו-חרסית על התגובה בשריפה של החומר. באמצעות בדיקות אימות החוקרים הסיקו ששיטת החישוב באמצעות CFD (Computational Fluid Dynamics) מקרבת את התוצאות היטב. כמו כן הם מצאו השפעה מיטיבה מאוד של 5% ננו-חרסית על התגובה בשריפה של החומר הפולימרי.

Ngo et al 2016

מחקר זה הוא המשכי למחקר הקודם ועסק גם כן בהתנהגות בזמן שריפה של GFRP למטרת הבנייה של יחידות תלת ממדיות בבנייה מודולרית. המחקר מתמקד תחילה באימות שיטת החישוב התיאורטית עבור מודל של בנייה עם קרום בודד מ GFRP על בסיס פוליאסטר בלתי רווי מחשב באמצעות הכלי החישובי את מהלך הבעירה בחדר עם קירות כריך מקרומי GFRP וליבת איזוציאנוראט ללא ועם חלון בקיר החוץ. מסקנות המחקר הן שבחדרים עם חלונות קצב הבעירה גדול וחייבים להתקין מתזים.

Isopescu et al 2017

מחקר תיאורטי העוסק ברמת אובדן האנרגיה של בית בודד בן 2 קומות המבוצע מקובייה ותיבות מודולריות. השלד הוא מפלדה, הרצפות מבטון על פח צורני עמוק, הקירות מכריך מבודד, הכולל בידוד על גבי העמודים ורכיבי הפלדה שבמעטפת. החוקרים מוכיחים בחישוב סטנדרטי לפי התקינה האירופאית שבנייה מסוג זה יכולה לא רק לעמוד בדרישות התקנות ברומניה, אלא לאפשר בנייה משופרת לעין ארוך מדרישות המינימום.

Pham et al 2017

המחקר בוצע במסגרת המאמצים לסלול את הדרך בענף הבנייה האוסטרלי לבנייה מודולרית כאמצעי חשוב במיוחד לתיעוש הבנייה. החוקרים מציעים כממצא עיקרי של מחקרם מסגרת תפקודית לבחינת ההתאמה של רכיבים המבוצעים בטכנולוגיות חדישות (שאינן מבוססות על בנייה מבטון) לבנייה מודולרית שנועדה לבניית קבע. המאמר סוקר את צרכי המשתמש, הדרישות התפקודיות (מילולית ואיכותית בלבד, ללא פירוט של הקריטריונים התפקודיים הכמותיים), הגורמים התפקודיים אליהם צריך להתייחס ואופן הבדיקה הכללי (בלי לפרט שיטות חישוב וכד'). הנושאים הנדונים קשורים אך ורק להתנהגות המכנית של הרכיבים בתנאי הייצור, השינוע, וההרכבה.

Kamali and Hewage 2017

המאמר מתאר את הפיתוח של דרישות התפקוד החלות על היחידות המודולריות החל מהייצור ועד מצבן הסופי בבניין. מדגיש שהתכן של רכיבי היחידה, המחברים, התמיכות הזמניות והקבועות, והמכלול השלם חייב לקחת בחשבון את כל שלבי הטיפול ביחידה, כולל תנאי ההשענה השונים והעומסים השונים הפועלים בכל שלב. החוקרים מפרטים באופן כללי את סוגי העומסים בשלבים השונים. מדגישים את הצורך להגדיר סבולות ייצור, הרכבה ושל הבניין המוגמר. כמו כן את הצורך בבחינת היחידות לפני התקנתן בבניין.

החוקרים מדגישים גם את הצורך להגדיר היטב את תחומי האחריות של הגורמים השונים, ואת אופי התיעוד של המערכת, וזאת בשל ההבדל בין תהליך התכנון והבנייה ש בניינים בטכנולוגיה זו מול הבנייה הקונבנציונלית, בה תחומי האחריות ואופן התיעוד של התכנון והמוצר הסופי ידועים היטב.

Xie et al 2018

מחקר מתאר מתודולוגיה שפותחה על מנת לחשב את תצרוכת האנרגיה בתהליך הייצור, ולחקור את הגורמים המשפיעים עליה על מנת לבצע אופטימיזציה של התהליך ולהפחיתה למינימום. האלגוריתם שפותח יושם על מפעל המייצר בניין מעונות חד קומתי באמצעות ארבע תחנות עבודה. אין במחקר מסקנות כלליות לגבי תצרוכת אנרגיה במפעלים לבנייה מודולרית.

א-6.1. מראי מקום

Isopescu, D.N., Maxineasa, S.G., Neculai, O., 2017, "Thermal Analysis of a Structural Solution for Sustainable, Modular and Prefabricated Buildings". International Conference on Innovative Research — ICIR EUROINVENT 2017. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 209 (2017) 012076.

Kamali, M., Hewage, K., 2016, "Life cycle performance of modular buildings: A critical review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 62(2016), p1171–1183.

Kamali, M., Hewage, K., 2017, "Development of performance criteria for sustainability evaluation of modular versus conventional construction methods". Journal of Cleaner Production 142 (2017) p3592-3606.

Lawson, R. M., Popo-Ola, S. O., Way, A., Heatley, T., Pedreschi, R., 2010, "Durability of light steel framing in residential applications". Proceedings of the Institution of Civil Engineers Construction Materials 163, May 2010, Issue CM2, p109–121.

Lee, W.H., Kim, K.W., Lim, S.H., 2014, "Improvement of floor impact sound on modular housing for sustainable building". Renewable and Sustainable Energy Reviews 29(2014) p263–275.

- MODCONS D5.1, 2013, "DEFINITION OF REQUIREMENTS FOR ACOUSTIC DESIGN OF A MODULAR BUILDING". FP7-SME-2012-1 GRANT AGREEMENT N° 315271 MODCONS DEVELOPMENT OF MODULAR CONSTRUCTION SYSTEMS FOR HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS.
- MODCONS D4.1, 2015, "Report on sustainability benefits of modular construction". FP7-SME-2012-1 GRANT AGREEMENT N° 315271 SYSTEMS FOR HIGH MODCONS DEVELOPMENT OF MODULAR CONSTRUCTION -RISE RESIDENTIAL BUILDINGS.
- Ngo, T.D., Nguyen, Q.T., Tran, P., 2016, "Heat release and flame propagation in prefabricated modular unit with GFRP composite facades". *Building Simulation* (2016) 9: p607-616.
- Nguyen, Q.T., Ngo, T, Tran, P., Mendis, P., Zobec, M., Aye, L., 2016, "Fire performance of prefabricated modular units using organoclay/glass fibre reinforced polymer composite". *Construction and Building Materials* 129 (2016) p204–215.
- Pham, L., Gad, E, Fernando, S., Hargroves, K., 2017, "Performance framework for modular construction". *PROCEEDINGS OF THE 24TH AUSTRALASIAN CONFERENCE ON THE MECHANICS OF STRUCTURES AND MATERIALS (ACMSM24), PERTH, AUSTRALIA, 6–9 DECEMBER 2016.* p789-792.
- Quale, J., Eckelman, M.J., Williams, K.W., Sloditskie, G., Zimmerman, J.B., 2012, "Comparing Environmental Impacts of Building Modular and Conventional Homes in the United States". *Research and Analysis, Construction Matters, Volume 16, No. 2, Yale University.*
- Xie, H., Chowdhury, M.M., Issa, R.R.A., Shi, W., 2018, "Simulation of Dynamic Energy Consumption in Modular Construction Manufacturing Processes". *J. Archit. Eng., March 2018, 24(1).*
- Zahharov, R.A., Bashkite, V., Karaulova, T., Miina, A., 2010, "INDUSTRIAL BUILDING LIFE CYCLE EXTENSION THROUGH CONCEPT OF MODULAR CONSTRUCTION". *Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, Volume 21, No. 1, ISSN p1726-9679.*

א-7. מערכות בבנייה מדולרית

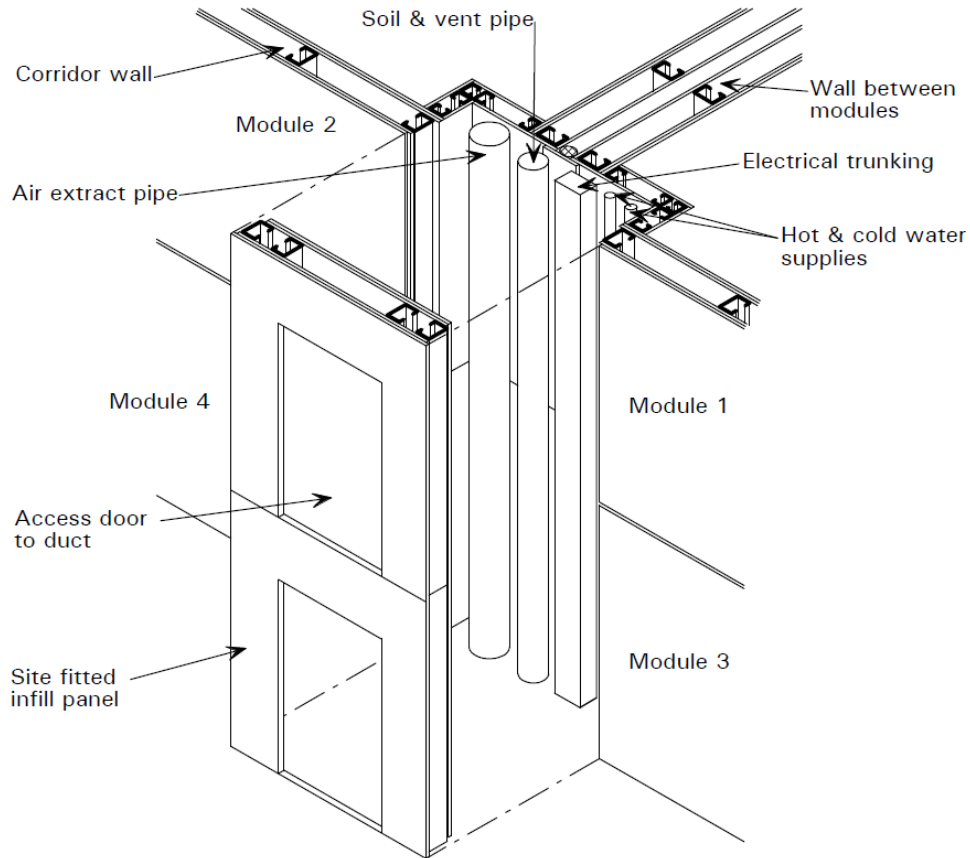
האופי המיוחד של מערכות המבנה בבנייה המודולרית טרם מצא את ביטויו באופן פרטני בספרות שנסקרה. ניתן למצוא התייחסות, אם כי מוגבלת, למערכות המבנה במסמכים המתארים את השיטה המודולרית בכללה. בסיכומו של דבר על מערכות המבנה לעמוד באותן דרישות תקינה כשל הבנייה בכל שיטה אחרת, יחד עם זאת ישנה משמעות לבעיות הנובעות מאופייה המיוחד של השיטה, בעיקר בנושא החיבורים בין היחידות המודולריות. המקורות שייסקרו להלן דנים בתיאור כללי של היבטים שונים של מערכות בבנייה המודולרית (Building and Construction Authority; Gardiner 2015;) (Gorgolewski et al. 2001; Ho and He xxxx; Monash University 2017), ובהתייחסות פרטנית לכל אחת ממערכות המבנה (Monash University 2017; Pan et al. 2008).

א-7.1 כללי

Gorgolewski ואחרים (2001) הבחינו בין פתרונות שונים למעברי מערכות כתלות בייעודו של המבנה: בבתי מלון בדרך כלל ישנו פיר אנכי הממוקם בפינות של היחידות לשם אחסון מערכות ניקוז, ביוב, ואספקת מים אנכיות. המערכות שבתוך המודול מיוצרות ונבחנות במפעל בעוד שהמערכות האנכיות מבוצעות באתר, תוך גישה לפירים מאזורים ציבוריים מבלי להיכנס לתוך היחידה המודולרית (פתרון גנרי של פיר מערכות בפינת מודול מפורט בציור המצוטט, אך אינו מספק למעשה דבר חוץ מתיאור סכמתי מקומי שאינו מלמד דבר על המערכת הכוללת). הפיזור האופקי של המערכות יבוצע באתר בתקרת השטחים הציבוריים. במבנים מסוגים אחרים יש לדעתם לתכנן את היחידות עם המערכות האופקיות במטרה למקסם את כמות העבודה שתיעשה ותיבחן במפעל. ביחידות דיור מערכות המים, החימום, והחשמל מותקנות ונבחנות במפעל ומרוכזות בסיכומו של דבר בנקודה אחת שבה יהיה החיבור למערכות הכלליות ללא צורך להיכנס ליחידה במהלך הבנייה בשטח.

המחברים מבחינים בין מספר אסטרטגיות לביצוע מערכות בבנייה מודולרית כדלקמן:

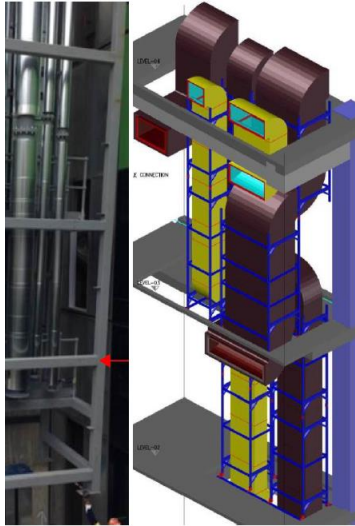
- שימוש בחללים הציבוריים לפרישת המערכות
- שימוש בחללי רצפות ותקרות לפרישת המערכות
- התקנת כל המערכות בתוך כל מודול במפעל כאשר העבודה באתר תכלול חיבורים בלבד
- ביצוע נקזים אנכיים בפינות המודולים
- חיבור אזורים רטובים גב אל גב על מנת ליצור ריכוז של שטחי שירות.



a) Isometric

מבט איזומטרי על פיר מערכות במלון המבוצע בבנייה מודולרית (Gorgolewski et al. 2001)

חשיבה מפורטת יותר על שילוב אלמנטים מודולריים של מערכות בבניינים מתוארת על ידי Darius Gloria He-ו Ho, כחלק מ"כח המשימה בנושא מערכות" של הרשות למבנים ובנייה [Building and Construction Authority (BCA) MEP Taskforce] בסינגפור. הפתרונות המוצעים על ידם מגדירים רצף של מידול ורמת הייצור במפעל, החל מרכיבים מיוצרים במפעל (prefab components), המשך בהרכבים מצומצמים של מערכות (prefab assemblies), ועד לביצוע חדרי מערכות כאלמנטי מבנה מודולריים (integrated assemblies. MEP PPVC). בין הפתרונות המוצעים על ידם ניתן למנות את: (1) חדרי מכונות מודולריים, המובלים לאתר כיחידה אחת כולל הציוד והצנרת; (2) מערכות אופקיות מיוצרות מראש, ו-(3) פירי מערכות מודולריים, כפי שרואים בציור המצוטט:



Prefab plant room

פיר מערכות אנכי מבוצע במפעל

חדר מערכות המבוצע בשיטה המודולרית

פתרונות מודולריים למערכות המבנה (Ho and He)

אחת הבעיות האופייניות בבנייה מודולרית, על פי Gorgolewski ואחרים (2001) היא איתור נזילות בצנרת, וזאת מהסיבה שהחללים המרובים הקיימים בין האלמנטים ינקזו את המים ישירות לקרקע מבלי שתהיה אפשרות לאתר את מקור הנזילה. פתרון מוצע אפשרי לבעיה זו הוא יצירת אגן ניקוז בכל קומה עם מוצא לפרוזדור ובצורה זו ניתן יהיה לזהות את מיקום הנזילה בקומה. בנוסף לכך ציינו Gorgolewski ואחרים (2001) כי יש לשאוף למקם את המערכות במקביל למערכת המבנית מבלי לחדור אליה, למרות שישנם פתרונות של יצירת מעברים בתוך המערכת הנושאת. בהמשך מפורטות הוראות התקנה למערכות השונות כגון מערכת החשמל ומערכות הגז, אך למעשה הן אינן מתייחסות להקשר המודולרי אלא להתקנת המערכות בקירות יבשים בלבד.

הטיפול בבעיות של המשכיות המערכות בהתקנה של האלמנטים המודולריים מפורט על ידי הרשות למבנים ובנייה בסינגפור (Building and Construction Authority). ההתייחסות היא בנפרד למערכות אנכיות (כגון מערכות הארקה ברקים, ניקוז מי גשם, ניקוז סניטרי), ולמערכות אופקיות (כגון חיווט, צנרת לחץ, וצנרות משופעים לניקוז אופקי). הדרישות למערכות אנכיות כוללות הבטחה של המשכיות אנכית, התקנת מחסומי רצפה שלא ישפיעו על עבודות הגמר שבוצעו במפעל, והבטחת מרווחי עבודה נאותים לשם ביצוע של עבודות החיבורים האנכיים. הדרישות למערכות האופקיות כוללות הבטחת המשכיות, תמיכה של כל נקודות החיבור על מנת לא להתפשר על השיפוע המתוכנן, ובמידה ונדרשות עבודות בחם יש לדאוג למרווחי עבודה בטוחים באתר ההרכבה.

בעיות הנובעות מתכן וביצוע המערכות בפרויקט מגדל סוהו (The SOHO Tower) בעיר Darwin באוסטרליה תואר על ידי Gardiner (2015). המיוחד בפרויקט זה הוא ההסבה לביצוע יחידות מודולריות בשלב מאוחר של הפרויקט, לאחר גמר רישוי ומכירה מוקדמת של יחידות דיור. לפיכך היה

צורך לשמור על התכן האדריכלי המקורי על כל המשתמע מכך. אחד הלקחים החשובים שציין המחבר הוא הבעייתיות שברכוז המערכות היורדות באמצע מודול, כפי שהוכתב על ידי התכן האדריכלי שכאמור נשמר בצורתו המקורית עקב רישוי ומכירה מוקדמים. מיקום פירי המערכות באמצע מודול כאמור הצריך כניסה של פועלים לדירות לצורך ביצוע של חיבורי המערכות מתוך המודולים, שסופקו לאתר מוכנים כולל גמר וכלים סניטריים. דרך עבודה זו גרמה לנזקים ולצורך בניקיון ותיקונים מיותרים לאחר חיבור המערכות. נראה כי הטיפול בפירי מערכות אנכיים מהווה נקודה בעייתית בפתרונות המוצעים על ידי הבנייה המודולרית, והכיוון שהוצע על ידי Gloria He ו-Darius Ho ותואר לעיל מהווה דרך בעלת פוטנציאל לפתרון נקודה זו.

בפרויקט זה יוצרו המודולים בסין ונשלחו בהובלה ימית להרכבה באתר לאחר ביקורת במפעל הייצור לפני משלוח היחידות לאתר. ביקורת זו בוצעה על פי התקינה האוסטרלית, דבר שהצריך עירוב של מעבדה מורשית אוסטרלית ושליחת בודקים מוסמכים מטעמה למפעל הייצור. התמודדות עם מערכות תקינה שונות, במקום הייצור לעומת מקום האתר, מתוארת גם אצל Monash University (2017), לא רק בין ארצות שונות אך גם בין המדינות השונות באוסטרליה עצמה.

ניתן לראות את תיעוש הבנייה של חדרי שירותים כתוצאה של ריכוז עבודות מערכות ועבודות גמר באזורים אלו. תיעוש זה בא לידי ביטוי החל מייצור חלקי צנרת ועד ייצור של חדרי שירותים מודולריים אף בפרויקטים בהם הבנייה העיקרית נעשית באמצעים קונבנציונאליים. Pan ואחרים (2008) מציינים את השימוש הנרחב ביחידות שירותים מודולריות בבריטניה (יחידות המכילות חדרי אמבטיה ושירותים מוכנים לשימוש). לדבריהם מספר סוגים של יחידות אלו נמצאים בשימוש בבריטניה – חדרי המבוססים על מבנה עץ, חדרי המבוססים על מבנה פלדה (פרופילים רגילים או דקי דופן) חדרי המבוססים על מבנה בטון, וחדרי המבוססים על glass reinforced polymer (GRP) בתוספת רצפת עץ ותקרת גבס. המחקר ההשוואתי שהציעו בוחן את עלויות האחזקה של סוגים שונים אלו. במסגרת המחקר נבחנו כ-400 יחידות שירותים, מתוכם 216 יחידות מבטון, 84 יחידות מ-GRP, ו-96 יחידות שניבנו בשיטה הקונבנציונלית. היחידות המודולריות סופקו לאתרים יחד עם כל מערכתיהן, כאשר העבודה היחידה שבוצעה בשטח הייתה חיבורן למערכת הבניין, ואילו המערכות של השירותים שנבנו בשיטה הקונבנציונלית בוצעו במלואן באתר. בחינת עלות האחזקה של חדרי השירותים העלתה כי היחידות מ-GRP היו הזולות ביותר באחזקה ואילו היחידות שניבנו בשיטה הקונבנציונלית היו היקרות ביותר. מסקנה זו נוגדת את תפיסה הרווחת בדבר הוצאות האחזקה הגבוהות של יחידות שירותים הבנויות מאלמנטים מודולריים.

א-7.2 התייחסות טכנית פרטנית למערכות המבנה – המדריך של Monash University

Monash University (2017) מציינים כי המערכות בבנייה המודולרית אינן דורשות מפרטים או רמת איכות שונה מזו הנדרשת בפרויקטים הנבנים בשיטות ביצוע אחרות. יחד עם זאת ישנן דרישות מיוחדות הנוגעות לתהליך ההקמה ולהמשכיות של המערכות בדגש על המשכיות של בידוד המערכות

בחיבורים ובצמתים וכן פירוט מיוחד שיאפשר פיקוח אופטימאלי. תכונות נוספות שתידרשנה בהקשר של הבנייה המודולרית נובעות ממספר רב של חיבורים והרצון להקטין ככל האפשר את העבודה המתבצעת בשטח. תכונות אלו תכלולנה בין היתר: (1) עמידות של היחידות המכילות מערכות בטלטולים במהלך ההובלה וההתקנה; (2) היחידות המכילות מערכות תידרשנה, בנוסף לעמידה בבקרת איכות טרם עזיבת המפעל, לעמוד בבחינה חוזרת של העמידה בדרישות התקינה והמפרטים לאחר ההרכבה, אך תוך שאיפה להפחית ככל שניתן את העבודה באתר; (3) יש להביא בחשבון את סבולות החיבורים של המערכות; (4) מספר יחידות תידרשנה להמשכיות (למשל של חיווט וצנרת) בעוד אחרות תידרשנה להפרדה (למשל בידוד תרמי ואקוסטי, איטום); (5) על המערכות המותקנות ביחידות להיות חשופות חלקית על מנת לאפשר חיבור עם המערכות של היחידות השכנות; (6) יש לוודא איטום מעברי אש, אם בין היחידות או בתוכן, על פי הדרישות. (7) יש לוודא בטיחות במהלך ההרכבה, בדגש על נגישות בטוחה לחיבורים הרבים של המערכות בין היחידות.

המסמך מטיל על המתכנן את האחריות להגדרת גבולות הגזרה בין יצרן היחידות לבין הקבלן המרכיב בשטח. על המתכנן להגדיר במפורש במסמכים את גבולות העבודה והאחריות בין הבנייה במפעל לבין הבנייה באתר. בנוסף לכך על המתכנן לזהות את המקומות בהן תושפע המשכיות או אי-המשכיות של חומרים על ידי תהליכי ההובלה וההרכבה בתחומים: (1) בטיחות אש ועמידות באש; (2) איטום; (3) רעידות ובידוד אקוסטי; ו-(4) בידוד תרמי.

הסקירה הפרטנית לגבי מערכות המבנה השונות כוללת התייחסות מעניינת לנושאים תכנוניים וביצועיים המיוחדים לבנייה המודולרית. רבות מן ההמלצות נוגעות להפניה למערכת התקינה באוסטרליה וניו זילנד, (AS/NZS Codes) ולא יפורטו בסקירה זו. מערכות המבנה המתוארות בפרק הן:

א-7.2.1 מערכות צנרת (המכונות במסמך hydraulics)

המערכות הכלולות בסקירה זו הן מים קרים, מים חמים, מים ממוחזרים, ביוב סניטרי, ניקוז מי גשמים, וצנרת גז. כפי שצוין לעיל בסקירה זו מופיעות הפניות רבות לתקינה האוסטרלית ולשאלות העלולות להתעורר כתוצאה של מעבר מאזור שיפוט אחד למשנהו. בנוסף לכך ישנה התייחסות לסבולות ההתקנה הדרושות לצורך פיצוי על תזוזות שונות בעת ההרכבה, התפשטות תרמית של מערכות, בעיקר של מערכות מים חמים וגז, ועמידות ברעידות אדמה. סבולות אלו מוגדרות על ידי המחברים כתזוזות של "10 מ"מ או יותר" הן במידות האנכיות, הן במידות האופקיות והן בצירוף של השתיים. יחד עם זאת מצוין כי הניסיון מראה צורך של פיצוי סבולות של עד 30 מ"מ. בנוסף לכך יש להביא בחשבון, בעת תכנון המערכות, תזוזות היכולות לנבוע מהסבולות המותרות במערכת המבנית. במקרים בהם אין אפשרות לאלץ את המערכות לסבולות האמורות יש לתכנן אלמנטים שיאפשרו התאמה של המערכות באתר לפיצוי על התזוזות מעבר לסבולות המותרות.

יש לתכנן את המערכת לעמידות בתנאי הסביבה במהלך ההובלה כולל: (1) עמידות בנגיפה; (2) עמידות בחשיפה לקרינת השמש; (3) עמידות בהשפעת של הובלה ימית; (4) עמידות של המודול וסביבתו מפני חדירת מים כתוצאה של כשל במערכת האינסטלציה.

בנוסף לכך יש לדאוג לניקוז נאות של המערכת למקרה של כשל בצנרת העלול לקרות במקומות חבויים שאין אליהם גישה במהלך הבנייה או לאחריה.

א-7.2.2 מערכות חשמל

יש לוודא כי היחידות המודולריות יעברו בחינה של המערכות החשמליות לפני עזיבתן את מפעל הייצור. מבחינה זו תהיה ההתייחסות אל מודול מבחינת המערכת החשמלית מקבילה לזו של התייחסות לכל מכשיר חשמלי. יש ליצור מערכת הבטחת איכות במפעל ובמקום ההרכבה שתכלול בין היתר בחינה ויזואלית של החיווט ובחינת רציפות מערכת ההארקה. המודול שיופסק לאתר יכלול תיעוד של הבחינות שנעשו במפעל כולל רשימת כל האלמנטים שעברו בחינה, פירוט של הבחינות שיש לעשות באתר ונוהל הפעולה המתקנת שיש לנקוט בה כאשר מתגלה כשל באחת מהבדיקות. יש לוודא שכל זאת יפורט במסמכי המכרז.

מבחינת גבולות האחריות מצוין שהיצרן יהיה אחראי לגבי כל ההתקנות החשמליות בתוך המודול, בעוד שהקבלן בשטח יהיה אחראי לחיבורים בין המודולים, אלו שיהוו בסיכומו של דבר את המעגל החשמלי השלם.

במקרה של הבנייה המודולרית ניתן להעביר את החיווט החשמלי בפירים אנכיים במסגרת המודולים או בפיר מרכזי אחד וממנו אופקית בין המודולים. זו החלטה שיש לקבל בשלב מוקדם של התכנון היות שיש לה השפעה על אלמנטים אחרים.

בפרויקטים שבהן יש מנייה נפרדת לכל קבוצת מודולים (כגון בנייה למגורים) לא יהיה מנוס מהובלה של כבלים מכל אחד מהמודולים אל תוך הפרוזדור הציבורי וממנו חזרה לשטח הפרטי. כתוצאה מכך יעברו בשכנות כבלים המופנים למערכות מנייה שונות ויש לתת תשומת לב מיוחדת לכך.

בנוסף לכך מומלץ להביא בחשבון פתרונות של חיווט מודולרי (modular wiring solutions) במערכות של מתח נמוך ומתח מאד. במסגרת שיטה זו הכבלים מיוצרים מראש על מנת שלאחר ההתקנה יהיה צורך רק בחיבורי "חבר הפעל" (plug and play). היתרון המובנה של שיטה זו הוא בין השאר בהקטנה מראש של העבודה באתר והיחסון בפחת של כבלים, כל זאת משום שאין צורך בהשארת רזרבות לחיבורים שאמורים להתבצע רק לאחר התקנת היחידות.

אלמנטים שונים המורכבים בפרוזדורים הציבוריים (כגון גלאי עשן ורמקולים) מורכבים לעיתים קרובות במרחקים שונים, שלא בהכרח לפי המרחק המודולרי של היחידות השונות. דבר זה ייצור דרישה למודולים שונים, וכן לדרישה להרכבתם על פי סדר התכנון החשמלי. אם זה נעשה מסובך מידי מומלץ להרכיב מערכות אלו באתר הבנייה.

א-7.2.3 מערכות חימום וקירור (HVAC: Heating Ventilation Air Conditioning)

לכאורה לא צריך להיות שינוי מהותי בין מערכות מיזוג האוויר במבנים מודולריים לבין אלו הנבנות במבנים בכל שיטה אחרת, ועל מערכות אלו לענות על כל התקנים הרלבנטיים. יחד עם זאת יש לוודא בקרת איכות במפעל של כל המערכות שהותקנו לפני משלוח המודולים לאתר הבנייה. בקרת איכות זו אמורה לכסות, בין היתר, את התחומים הבאים: (1) מבחן לחץ של הצנרת ותעלות האוורור; (2) בדיקת הפעלה של הציוד ומערכות הבקרה; (3) בדיקת הפעלה של כל המערכות, ככל שהדבר מעשי; (4) בדיקה ויזואלית של החיווט, הן לפני והן אחרי ההובלה; (5) כל בחינה רלבנטית אחרת כפי שתידרש על ידי יצרן הציוד. כמו כן יש לתת את הדעת על הכשרת העובדים המבצעים את הבקרה במפעל הייצור, ובאם אין אפשרות לבצע בקרה זו על הקבלן המרכיב יהיה לקבל אחריות כוללת על המערכת. על האלמנטים שסופקו לאתר להיות מלווים בכל התייעוד אודות בקרת האיכות שבוצעה כאמור לעיל. כברירת מחדל יצרן המודולים יהיה אחראי למערכת הנמצאת בתוך המודולים בעוד הקבלן באתר ייתן את הכיסוי לכל החיבורים ביניהם. בכל מקרה, בסיכומו של דבר צריך להיות גורם אחד שייקח אחריות כוללת על המערכת, דבר שאמור להיות מוגדר מראש במסמכי החוזה.

על המתכנן להיות בקשר עם הקבלן המבצע מוקדם ככל שניתן ולתאם עמו את מיקום חלקי המערכת על מנת לא ליצור סיבוך מיותר בתהליך ההתקנה. המעברים האנכיים בין המודולים יכולים להיות מתוכננים ומבוצעים בפירים אנכיים מקומיים במסגרת המודולים או בריכוזים קומתיים שמהם יהיו חיבורים אופקיים אליהם.

כאשר המודולים מיוצרים בארצות חוץ יש לתת את הדעת על מספר נקודות עיקריות: (1) עמידה בכל התקנות הרלבנטיות בארץ היעד; (2) האחריות על אלמנטי מערכת בארץ היעד יכולה להיות קשורה לרכש מספק מקומי ויש להסדיר זאת מראש; (3) כל החומרים יעמדו בדרישות העמידות באש הרלבנטיות בארץ היעד; (4) על כל מערכות השליטה והבקרה לעמוד הדרישות התקנות בארץ היעד. במידה שהמערכות העיקריות כוללות ציוד, כגון צ'ילרים או מפוחים, יש לוודא כי נערכו הסידורים המתאימים לשם איזון המערכת הכללית ומסירתה. כמו כן יש לוודא אפשרות של חיבור המערכות בין המודולים, כולל הסדרת גישה להרכבה ואחזקה של חלקי המערכת כגון חיבורי צנרת, תעלות, ודמפרי אש במקומות שתוכננו.

א-7.3 מראי מקום

Building and Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Prefabricated Prefinished Volumetric Construction". Building and Construction Authority, Singapore.

- Gardiner, P., 2015, "The construction of a high-rise development using volumetric modular methodology". Proceeding of the CTBUH 2015 international conference, Wood, A. and Gabel, J. Eds. Now York, p136–143.
- Gorgolewski, M. T., Grubb, P. J., and Lawson, R. M., 2001, "Design of Residential Buildings". SCI Publication 302. Steel Construction Institute.
- Ho, D., and He, G. "Prefabricated mechanical electrical and plumbing (MEP) systems, the way forward", Building and Construction Authority, Singapore.
- Monash University, 2017, "Handbook for the Design of Modular Structures".
- Pan, W., Gibb, A.G.F., and Sellars, A.B., 2008, "Maintenance cost implications of utilising bathroom modules manufactured offsite". Construction Management and Economics, 26, p1067-1077.

א-8. היבטים של תהליך ובקרת הביצוע

Moghadam et al. 2012

המחברים מסבירים ומדגימים את החשיבות של עריכת סימולציה יחד עם ויזואליזציה כחלק מתכנון לוח הזמנים של הרכבת יחידות מודולריות באתר הבנייה. ככל שנתוני הקלט בסימולציה יהיו מדויקים יותר, כך יהיה ניתן להעריך בעזרתה בצורה טובה ונכונה יותר את סדר ההרכבה, את משך ההרכבה, את התנאים המגבילים וכיו"ב. לדבריהם הבנייה המודולרית מעלה צורך בסטנדרטים חדשים של דיוק בהערכת המשימות בענף הבנייה ברמה של דקה-אחר-דקה. העניין מוצדק נוכח השימוש בציוד יקר במיוחד, כמו עגורנים מתנייעים ומערכות לוגיסטיות יקרות של תובלה. על-כן, משתלם לתרגל את המשימות כמה וכמה פעמים, ולבחון כמה וכמה אפשרויות באמצעות שילוב של סימולציה עם המחשה ויזואלית, לפני שמחליטים על שיטת העבודה, בחירת הציוד, ארגון האתר וכיו"ב. המערכת הניסויית הופעלה על פרויקט מתוכנן של 32 קומות בברוקלין ניו-יורק, המורכב מכ- 950 יחידות מודולריות מפלדה. בדיקות ההמחשה המוקדמות האלו (כמוצג בתמונה המצוטטת מהמאמר) סייעו לתכנון היעיל של כל אופרציית ההרכבה שאמורה להסתיים ב- 56 ימי עבודה (ראה תיאור מקרה בוחן זה בפרק א-13). (Dean 461, Brooklyn – 13).

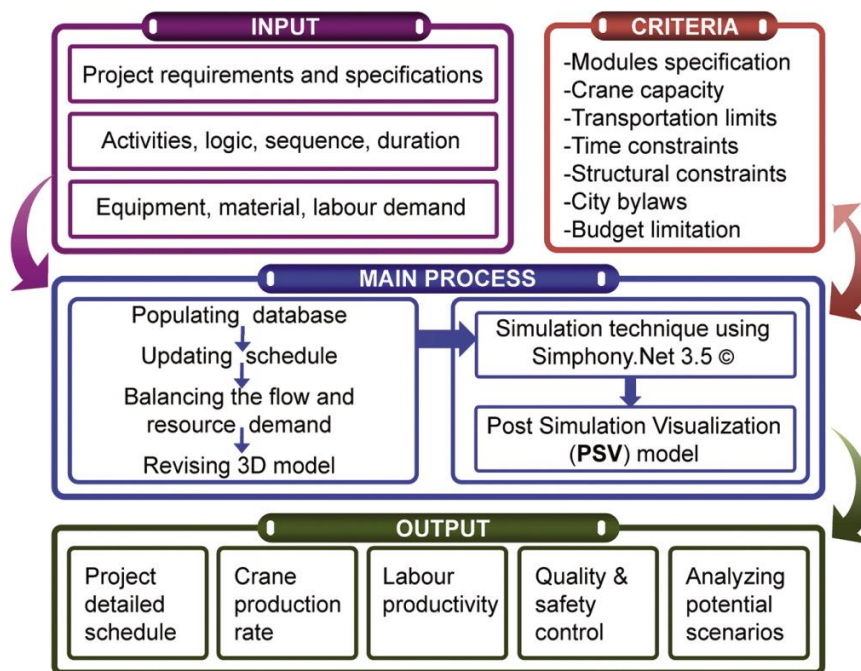


Fig. 2. Output of PSV model on the case study presenting module lifting operation.



Fig. 5. Evaluation of construction operation scenarios: (a) proposed pop-rivet system for connections and lifting of modules, (b) use of scaffolding

Yu et al. 2013

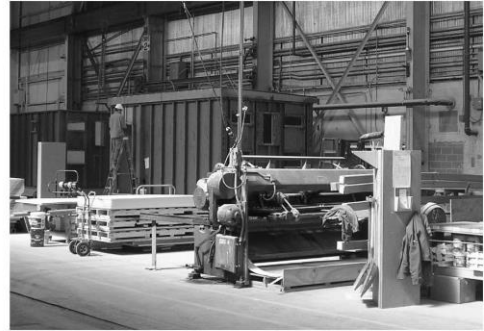
המחברים מתארים ומנתחים אירוע של יישום עקרונות LEAN במפעל וותיק המייצר בתים מודולריים בניו-ג'רסי. היישום הוכתר על-ידם כהצלחה גדולה במובנים של פריון הייצור, תשומות עבודה, שיפור האיכות, הקטנת פחת ושיפור הבטיחות. אכן, ההישגים מרשימים, אך אין בתוצאות האלו רבותא גדולה, אלא בעובדה שמדובר בענף הבנייה. ככל הנראה היו מתקבלים הישגים דומים גם לו היה מדובר במפעל להרכבת אוטובוסים, למשל. יש במאמר הזה הוכחה נוספת ליתרון הגדול של מפעלי בנייה מתועשת בכך שניתן ליישם בהם שיטות מוצלחות מתעשיות אחרות, לעומת אתרי בנייה רגילים, אשר בהם יש קושי גדול לאמץ שיטות מוצלחות ממגזרי הייצור. היישום נעשה במחלקה אשר ייצרה מאות יחידות מודולריות, כמעט זהות, של מבנים תלת-ממדיים מוכנים ומאובזרים לתחום התקשורת הסלולרית (בתמונה המצוטטת מהמאמר רואים מחלקה אחרת במפעל, אשר בה מייצרים יחידות מוגמרות בשביל פרויקט אחר של מעונות סטודנטים).



ייצור ואחסנה במפעל של יחידות מודולריות למעונות סטודנטים



(a)



(b)

אחת מעמדות הייצור לפני ואחרי יישום עקרונות LEAN







Smith and Rice 2015

זהו דו"ח פרסומי צבעוני ומעוצב שהוכן בעבור ומטעם ארגון MBI שהוא אינטרסנטי לקידום הנושא של בנייה מודולרית. הדו"ח מנסה לתמצת את היתרונות, המכשולים, האתגרים וכו' בבנייה מודולרית של מבני קבע. הממצאים מתבססים בעיקר על סקר ספרות, שאלונים וראיונות. המחברים מגיעים למסקנות המוכרות, שבאופן כללי – בנייה מודולרית מקצרת את לוח הזמנים, משפרת את האיכות ומצמצמת את העבודות באתר. המכשולים הגדולים הם בתחומים של התרבות השלטת של תכנון ובנייה, בעיות תובלה ולוגיסטיקה, מרחק גדול בין המפעל לאתר, חוסר מודעות של בעלי העניין לנושא, וקשיים מול ארגוני עובדים. המחברים מביאים ניתוחים מספריים די-שטחיים של עלות, זמן ואיכות לגבי כתריסר פרויקטים ספציפיים עם הערכה גסה של המספרים המקבילים בבנייה קונבנציונלית. מסקנתם העיקרית היא שראוי וצריך לעודד את הבנייה המודולרית משיעורה הנוכחי, כ-4% מן הבניינים בארה"ב, לשיעורים כפולים ומכופלים.

אחד הפרויקטים המעניינים מבחינתנו בדו"ח זה הוא בניין מגורים בן 5 קומות בפילדלפיה, שנבנה מ-89 מודולים מרחביים על-בסיס שלד מעץ, אשר יכול היה יכול להיבנות בשיטה הקונבנציונלית של בנייה בעץ (כמקובל בארה"ב). החיסכון בזמן היה כ-63%, והחיסכון בעלות – 26%, לעומת הערכות מקצועיות מבוססות לגבי הקמת מבנה דומה לו בשיטה קונבנציונלית.

Zhang et al. 2016

בדומה למאמר קודם, גם מאמר זה מתמקד בפוטנציאל של יישום שיטות LEAN לתהליכי הייצור של יחידות בנייה מודולריות במפעל מאורגן. המחברים מתארים את תהליכי הייצור של מסגרות פלדה מפרופילים דקי דופן, מנתחים את התהליך, ומראים את הדרך לשיפורו וייעולו, תוך כדי הקטנת אחוז הפחית, ניצול טוב יותר של רצפת הייצור, שיפור הבטיחות בעבודה והבטחת האיכות. מאמרים מסוג זה מדגימים שוב ושוב את הפוטנציאל הקיים בהעברה של אחוז גבוה ככל האפשר מתהליכי הייצור מאתר הבנייה אל מפעלים מסודרים. באיור הבא, המצוטט מהמאמר, מראים בפשטות תהליך סטנדרטי של ביצוע משימה מסוימת בשלבים ברורים ופשוטים, אשר ניתן בקלות לוודא את איכות הביצוע שלה. אלו הן רמות של איכות ויעילות שאינן בנות-השגה באתר הבנייה המצוי.

Standard Operating Procedure		Process: ASSEMBLY PROCESS Date: SEPT. 2015 By: NDY INYANG
<p>1 CHECK DRAWING</p>  <p>Check Drawing for</p> <ul style="list-style-type: none"> • Number of studs • Types of Studs 	<p>2 PICK FRAME COMPONENTS</p>  <p>GET frame component from RACK or FLOOR stock and place on ASSEMBLY table</p>	<p>3 INSTALL CLIPS</p>  <p>Mark, Align and Install CLIP</p>
<p>4 CUT STUD FOR CONNECTION</p>  <p>Cut Stud for Connection</p>	<p>5 ASSEMBLE STUDS</p>  <p>Assemble Components for King Studs, King Tracks, Sill, Cripple as per Drawing</p>	<p>6 MARK, WRAP AND MOVE</p>  <p>MARK PANEL WRAP</p> <p>Mark, Wrap and Move Panel Components to framing</p>

Oh et al. 2017

מאמר מעניין של קבוצה מדרום-קוריאה העוסק בניצול אופטימלי של נפחי המארזים במשלוח ימי של בתים מבנייה מודולרית המשמשים בעיקר למגורי עובדים באתרים גדולים. היחידות הן די פשוטות ואחידות, והאתגר של הכותבים היה לארוז אותן ביעילות מרבית בדומה למכולות סטנדרטיות. הם מציגים פתרון של "דחיסת" הרבה רכיבים, חלקם נפחיים וחלקם מישוריים, ביחידה (שתהיה חלק מן המבנה הסופי), ופריסתם אח"כ של היחידות באתר "לסירוגין" (בסגנון של "אחד – כן, אחד – לא", כמוצג בתמונה המצוטטת מהמאמר) לשם קבלת נפח שימושי כמעט כפול.



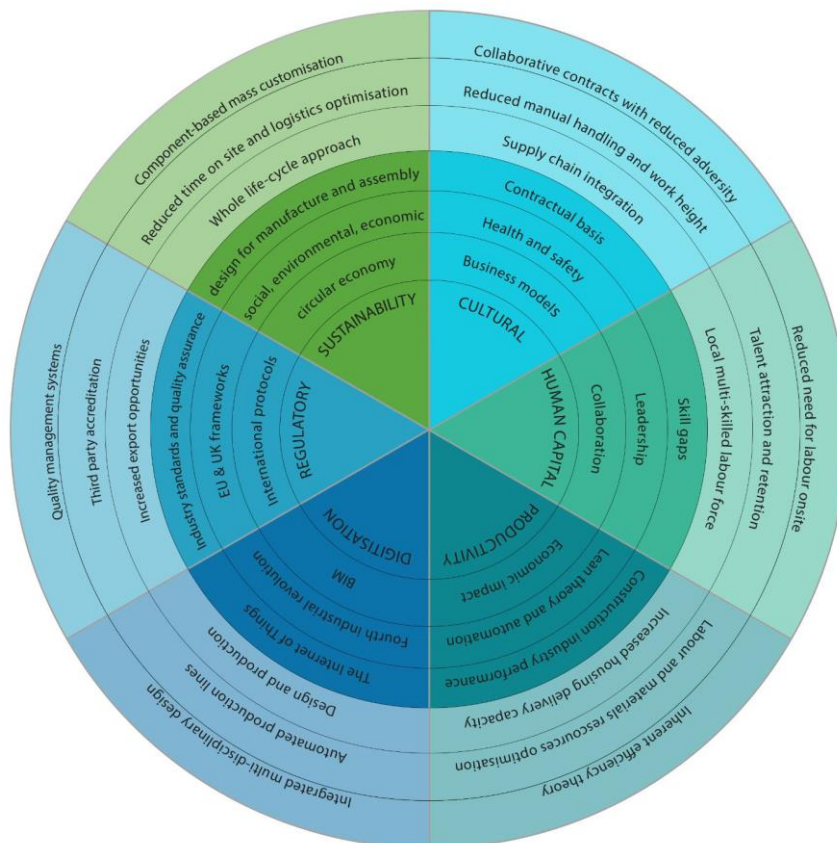
Duncheva and Hairstans 2019

המאמר מציג שיטות איכותניות כדי לסייע למקבלי החלטות בכירים בנושאים של בנייה מתועשת / מודולרית (offsite).

המחברים מסבירים שהנושא הוא מורכב; יש בו היבטים רבים ומגוונים; וכיוון שקשה להציגו בפשטות – מקבלי החלטות בכירים נרתעים מלהיכנס לתסבוכת שאינה מוכרת להם, ומרוב בלבול מוותרים מראש על דיון מפורט באופציה המודולרית. הכותבים זיהו, באמצעות סקר ספרות, 6 תחומים ראשיים שראוי להציג בפני מקבלי החלטות כשיקולים פוטנציאליים לבחור בבנייה מתועשת, ואלה הם:

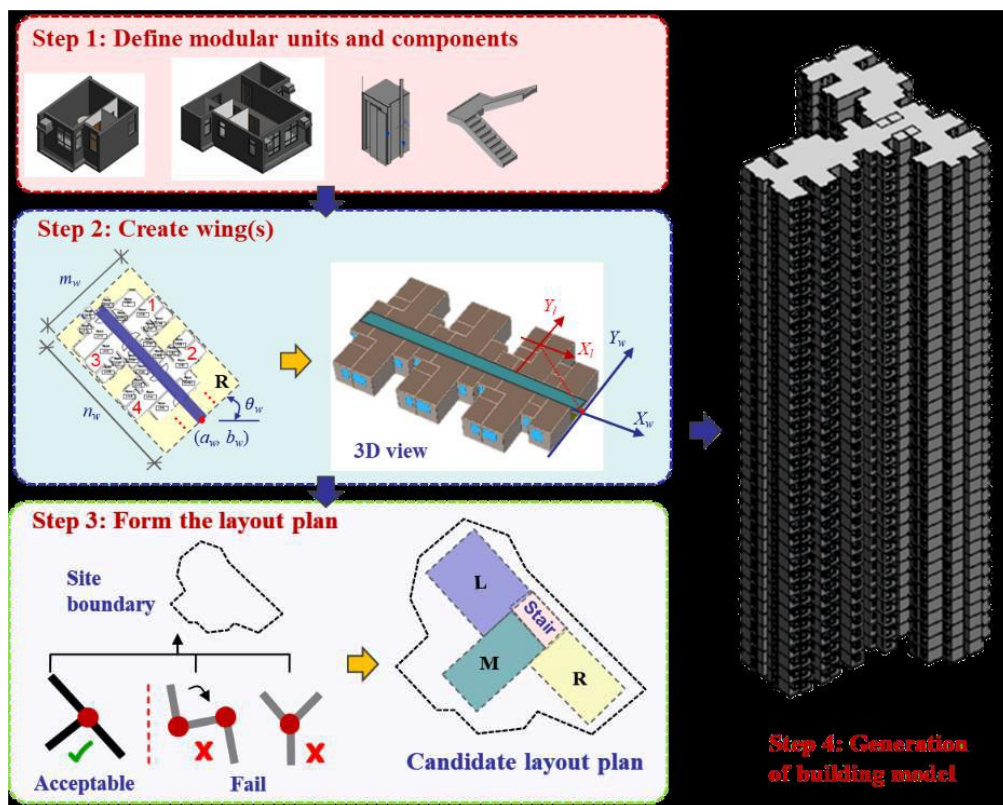
1. sustainability
2. culture
3. human capital
4. productivity
5. digitization
6. regulatory

בכל אחד מששת התחומים הם פרטו תת-תחומים שראוי להביא בחשבון בתוך כלל מסכת השיקולים. עיקר המאמר עוסק בבחירת הצורה החזותית (הוויזואלית) הגרפית הטובה ביותר להמחשת העניין בצורה שתהא קלה להבנה. לטענתם, עצם הזיהוי של ששת התחומים הראשיים ונגזרותיהם מהווה תרומה לתחום של בנייה מתועשת, אע"פ שהכותבים עצמם לא נכנסו לעובי הקורה בענייני התוכן, אלא בחרו להתמקד באופן ההצגה. הם בחנו באמצעות קבוצות מיקוד כמה וכמה חלופות תצוגה גרפיות, ולבסוף ממליצים על צורה מעגלית קונצנטרית, אשר מתקדמת מן המרכז כלפי חוץ, מן הכלל אל הפרט, ועושה שימוש בצבעים ובגוונים של כחול וירוק, כמוצג בתמונה המצוטטת מהמאמר:

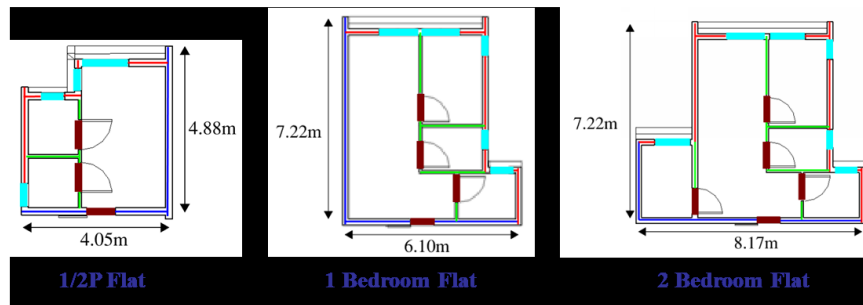


Gan et al. 2019

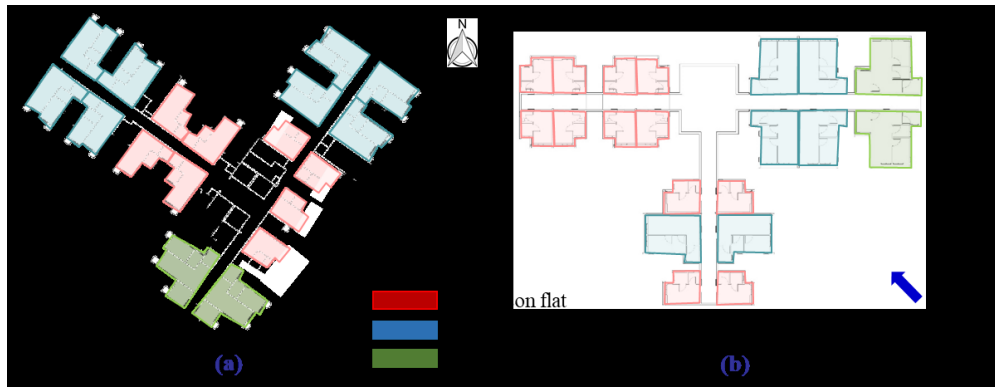
המאמר נכתב על ידי קבוצת חוקרים מן האוניברסיטה הטכנולוגית של הונג-קונג. הוא עוסק בתהליך אופטימיזציה לסידור של קבוצת בניינים מודולריים גבוהים בתוך אתר הבנייה המתוכנן, תוך התחשבות בכיווני אור, כיווני רוח, נוף, אזור, יעילות אנרגטית, הסתרה הדדית וכיו"ב. לדברי המחברים הנושא רלוונטי במיוחד לבנייה מודולרית אשר בה קובעים בד"כ בשלב מוקדם את תמהיל דגמי הדירות, שמספרם די מוגבל, מתוך "קטלוג" הדגמים של החברה. במקום להשתמש בדרך הנפוצה של ניסוי וטעייה על-ידי המתכננים ויתר מקבלי ההחלטות בצורה אמפירית, מציעים המחברים להשתמש באלגוריתם גנטי, אשר לטענתם מוליך די-מהר לתוצאה מיטבית (או קרובה למיטבית). הם מדגימים את השיטה על קבוצה של בניינים (מחוברים) בני 40 קומות, עם מאות דירות משלושה דגמים, אשר נעשה להם כבר תכנון ראשוני שנראה סביר (כמודגם בתמונות המצוטטות מהמאמר). המחברים טוענים שבזכות תהליך האופטימיזציה הושג חיסכון אנרגטי של 30 עד 40 אחוזים ויתרונות נוספים, מבלי להתפשר על המאפיינים החשובים שהוגדרו מראש. מערכת תומכת החלטה מעין זו יכולה לטענתם לתרום לכלכליות, לתפקוד הסיביתי ולאפקטיביות של כל בנייה, אבל – של בנייה מודולרית באופן מיוחד.



התהליך בכללותו עם ארבעה שלבים עיקריים



טיפוסי הדירות האופייניות (כדאי לשים לב לשטחי הדירות)



התכנון המקורי הידני (a) לעומת התכנון האופטימלי בעזרת האלגוריתם הגנטי (b)

א-8.1 מראי מקום

Duncheva, T., Hairstans, R., 2019, "Decision Support Tool for Enhancing the Economic Impact of Construction using Offsite Systems". International Conference on Modular and Offsite Construction, Banff, AB Canada, 21-24 May, 2019.

Gan, V.J.L., Tse, K.T., Cheng, J.C.P., Lo, I.M.C., Chan, C.M., 2019, "Site-specific Modular Design Optimization for High-rise Residential Buildings". International Conference on Modular and Offsite Construction, Banff, AB Canada, 21-24 May, 2019.

Haitao Yu, H., Al-Hussein, M., Al-Jibouri, S., Telyas, A., 2013, "Lean Transformation in a Modular Building Company: A Case for Implementation". JOURNAL OF MANAGEMENT IN ENGINEERING © ASCE / JANUARY 2013 / 103.

Moghadam, M., Al-Hussein, M., Al-Jibouri, A., Telyas, A., 2012, "Post simulation visualization model for effective scheduling of modular building construction". Can. J. Civ. Eng. 39: 1053-1061 (2012).

- Oh, S., Cho, B., Kim, D.J., 2017, "Development of an Exportable Modular Building System by Integrating Quality Function Deployment and TRIZ Method". *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*/September 2017/542.
- Smith, R.E., and Rice, T.,2015, "Permanent modular construction: Process, Practice, Performance". Modular Building Institute (www.modular.org).
- Zhang, Y.Y., Fan, G., Lei, Z., Han, S.H., Raimondi, C., Al-Hussein, M., Bouferguene, A., 2016, "Lean-based diagnosis and improvement for offsite construction factory manufacturing facilities". 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2016).

א-9. היבטים כלכליים של בנייה מודולרית

Rogan et al. 2000

המאמר בוחן פרויקטים של בנייה מודולרית בבריטניה ומשווה אותם לבנייה הקונבנציונלית. המאמר שם דגש על החיסכון בעלויות הנגרם מזמן בנייה קצר יותר.

הטבלה הבאה מציגה השוואת עלויות בין הבנייה המודולרית לבנייה הקונבנציונלית באחוזים:

Table 1. Comparison of traditional and modular construction in terms of capital cost (as percentage of the total cost).

Elements of construction	Traditional	Modular
External works and service connections	9	9
Foundations and sub-structure	7	6
Framework and floors	10	---
Modular units (fully fitted out)	---	50
Internal fitments	12	incl. in units
Roof structure and roofing	5	3
External cladding	15	10
Communal areas, access, stairs and lifts	8	8
Mechanical and electrical services	15	5
Drainage and rainwater	4	4
Site preliminaries, etc.	15	5
	100%	100%

ניתן לראות כי בבנייה המודולרית, עלות היחידות המודולריות המרכיבות את הבניינים מהווה כ-50% מכלל העלות הכוללת של המבנה. עם זאת, בעלות זו גלומים גימורים סופיים המהווים בבנייה הקונבנציונלית 12% מסך הכלות הכוללת של הבניין. מרכיבי העלות המשמעותיים ביותר בבנייה הקונבנציונלית הם ציפויים מתכתיים חיצוניים (15% אל מול 10% בבנייה מודולרית) ושירותי חשמל ומכניקה (15% אל מול 5% בבנייה מודולרית).

הטבלה הבאה בודקת את חיסכון העלויות בבניין מודולרי המשמש כמלון:

Table 2. Savings due to use of modular construction in a hotel extension.

Basic construction cost	£800/m ²
Room rate per week (based on 70% occupancy)	£5/m ²
Time saving in construction	20 weeks
Financial benefit	£100/m ²
Loss of room bookings due to disruption (based on 20% loss)	£1.5/m ²
Conventional construction period	45 weeks
Equivalent saving	£70/m ²
Total saving	£170/m²
Percentage of construction cost	22%

ניתן לראות כי בעוד שהעלות הבסיסית של מ"ר היא כ-800 ליש"ט, סך החיסכון הוא 179 ליש"ט למ"ר. החיסכון נובע מכך שבנייה מודולרית היא מהירה יותר, מה שמאפשר לאכלס את חדרי המלון בטרם עת. בנוסף, בגלל זמן בנייה קצר יותר יש גם פחות הפרעות של רעש ופסולת לסביבה הקרובה בשכונה. המאמר בוחן מספר מקרי בוחן של מבני מגורים, מלונות ומשרדים שנבנו בבנייה מודולרית. להלן מקרה בוחן של מבנה מגורים מודולרי: מדובר במבנה של 5 קומות, המורכב מיח' מודולריות ברוחב של 3.2 מטר. בפרויקט זה גרם המדרגות והמרפסות גם כן נבנו באופן מודולרי. כיוון שהבניין נבנה באופן מהיר יותר, נרשמו הכנסות שכירות של £ 58,500 ביחס לבנייה הקונבנציונלית. בנוסף, נרשמה הגדלת שווי הנכס ב-4.02 מיליון ליש"ט נוספים בהשוואה לבנייה קונבנציונלית כתוצאה מבנייה איכותית יותר. המאמר מצא גם כי בנייה מודולרית חוסכת את העלות של תיקונים ושיפוצים שלאחר סיום פרויקט, היכולים להגיע ל-2%-1% מסך עלות הפרויקט.

להלן ניתוח כלכלי של בניין מודולרי בן 4 קומות הכולל 30 דירות המורכבות מ-60 יח' מודולריות במרכז לונדון:

Table 3. Bill of Quantities for a typical 4-storey residential building in London.

Bill item	Modular construction £/m ²	Traditional construction £/m ²
Substructure	66	66
Superstructure:		
Modular dwelling units	529	
Traditional construction		450
Other frame components (to stair tower)	92	92
Upper floors, access walkways and balconies	25	25
Roof	30	30
Staircases (communal)	10	10
External walls (cladding)	93	93
Windows and external doors	5	5
Internal walls and partitions	20	20
Internal doors	2	2
Group Element Total	806	727
Internal Finishes:		
Walls	0.5	0.5
Floors	0.5	0.5
Group Element Total	1	1
Services:		
Landlords electrical installation	11	11
Communication installation	12	2
Lift installation	16	16
Group Element Total	29	29
Preliminaries	70	105
Contractors' design fees, Insurances etc	42	42
Scaffolding		18
Call-backs		7
Additional skips		2

הטבלה כוללת השוואה של בניית אותו מבנה בן 4 קומות בבנייה מודולרית אל מול בנייה קונבנציונלית. אמנם ניתן לראות שהעלות למ"ר של יח' מודולרית היא יקרה יותר משל יח' דיור בבנייה קונבנציונלית, אך לבנייה קונבנציונלית יש עלויות שנחסכות בבנייה מודולרית, כגון: חלק מעבודות ההכנה, פיגומים ותיקונים לאחר מסירת הבניין, אשר בגלל האיכות הגבוהה הם מופחתים בהרבה בהשוואה לבנייה קונבנציונלית.

המאמר מתאר מודל כלכלי ששימש לניתוחים הנ"ל: המודל לוקח בחשבון עלויות בנייה, עלויות של שכירות דירה מוקדמות (הכנסות כתוצאה מסיום פרויקט מוקדם), וערך נכס גבוהה יותר כתוצאה מבנייה איכותית יותר. המשתנים שנלקחו בחשבון: גודל הפרויקט, מטרת הדיור (מלון/משרדים/דיור), עלות הקרקע, עלות הבניין, שיעורי ריבית, עמלות, הוצאות מימון. המודל הפיננסי התבסס על נתוני מכירות רבעוניים בענף הבניין בבריטניה; ועל מדדי עלויות בנייה אזוריות. כך לדוגמה, ערך מכירה אזורי בו השתמשו במחקר הוא 304 ליש"ט למ"ר, בהתאם לנתון שסופק על ידי סוכן נדל"ן מקומי עצמאי. בסך הכול, נמצא כי זמן בנייה ממוצע בבנייה קונבנציונלית הוא 9 חודשים, לעומת זמן בנייה ממוצע בבנייה מודולרית של 6 חודשים.

הטבלה הבאה מציגה פירוט נוסף של חסכונות שיש בבנייה המודולרית:

Table 4. Financial savings resulting from modular construction

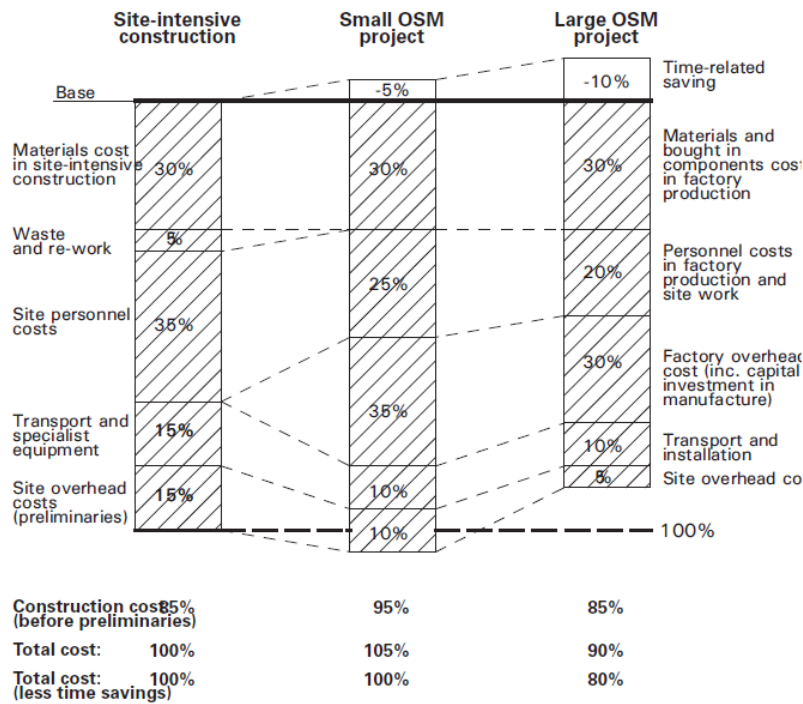
	Traditional	Modular	Difference		Other benefits
Construction period	9 months	6 months	3 months shorter	33% faster	Savings on preliminaries
Development period	13 months	10 months	3 months shorter	23% sooner	Release of developers investment
Sales start	7 months	5 months	2 months earlier	29% sooner	Quicker return on capital
Profitability	£4,639,137	£4,676,308	£37,171 more profit	0.8% higher	Benefit to the builder
Internal rate of return	222%	316%	94% higher	43% increase	Benefit to the builder
Peak cash required	£1,910,677	£1,787,022	£123,655 less	6.5% lower	Benefit to the builder
Average cash required	-£180,569	-£410,648	£230,079 less		Lower borrowing
Turnover using same capital (Ratio of development period x peak cash)				39% extra	Ability to expand

ניתן לראות בבירור כי יש החזר הון מהיר יותר בבנייה מודולרית.

Lawson and Ogden 2005

מאמר זה סוקר את ההתפתחויות במערכות בנייה טרומיות בהן נעשה שימוש בבנייה מפלדה קלה ובבנייה מודולרית, ומתאר את ההקשר הכלכלי שבו התרחב השימוש במערכות אלו. המאמר מציג דוגמאות של פרויקטים שנבנו בשיטות אלו ומתאר שיטות בנייה היברידיות/מעורבות (כאלה המערבות בנייה קונבנציונלית עם בנייה מודולרית) אשר מייעלות את עלויות הייצור ואת השימוש באתר הבנייה. נכון לשנת 2003 בבריטניה, בנייה מפלדה היוותה כ-20% נתח שוק בקרב בנייה המיועדת למגורים (בנייני מגורים, מעונות סטודנטים, מלונות). עבור בניינים בני 2-3 קומות נתח השוק של בנייה מפלדה (בתחום הבניין מחוץ לאתר העבודה) עמד על 3% בלבד. עם זאת, השימוש בפלדה הוא הרבה יותר גבוה (הערכה של כ-30%) במגורי סטודנטים ומגורי לינה צבאית, המוערכות בכ-30 אלף יחידות לינה בשנה. מעניין לשים לב כי 90% מהפלדה ממוחזרת/עוברת שימוש חוזר.

הגרף הבא מציג השוואה בין בנייה טרומית לבנייה קונבנציונלית:



בגרף ניתן לראות שבבנייה רגילה יש עלויות של פסולת ובנייה מחדש המהווים 5% מעלות הפרויקט. בנוסף, נראה שפרויקטים קטנים עלולים להיות לא כדאיים כלכלית, אך בפרויקטים גדולים אפשר להגיע לחיסכון עלויות של 10%-20% בנוסף לצמצום זמני הביצוע.

כדי לחשב את הכדאיות של בנייה מודולרית יש לבחון את העלויות הנוספות של הקמת מפעל לייצור יח' מודולריות אל מול החיסכון בעלויות של בנייה זו. עלות הקמה של מפעל מתקדם ואוטומטי (fully automated) לייצור של יח' מודולריות עומדת על כ-10 מיליון ליש"ט. מה שמאזן עלויות הקמת מפעל לייצור יח' מודולריות, זה חיסכון בעלויות ייצור עקב שימוש בטכנולוגיות יעילות יותר, צמצום בעלויות בנייה באתר העבודה, וחסכון הקשור בקיצור זמן הבנייה.

חיסכון בזמן מוערך בכ-30%-50% מזמן הבנייה בבנייה קונבנציונלית. עם זאת, יש קושי להעריך את העלות של השלמת בנייה מוקדמת במונחי כסף, כיוון שהיא מושפעת מפעילות עסקית והכנסות של הקבלן. במרבית הפרויקטים בבנייה בשיטת off-site manufacture, שיעור העבודה באתר העבודה עצמו עומד על כ-20%-40% מכלל העבודה בפרויקט.

Hofman et al. 2009

המחברים שואלים: כיצד על היחסים בין קבלן לספק להיראות כדי לתרום ולקדם את תחום הבנייה המודולרית ולהגיע לתוצאה המיטבית? מקרה הבוחן במאמר היא חברת בנייה מודולרית קבלנית הולנדית ויחסיה עם כ-10 ספקים. כותבי המאמר מגיעים למסקנה כי יחסים אלו מושפעים גם מהיצע, וגם מביקוש, ובפירוט: בצד הביקוש מהלקוח - מורכבות העיצוב והבנייה שהלקוח דורש, בצד הספק -

היקף ההשקעה הנדרשת מהספק, מידת התלות בידע של הספק, והכוונות ההדדיות של הספק והקונה במערכת היחסים הזו.

Jaillon & Poon 2010

המחברים כותבים כי טכניקות בנייה טרומית אומצו בשני העשורים האחרונים בפרויקטי דיור ציבוריים בהונג קונג, אך השימוש בבנייה טרומית במגזר הפרטי נכנס לשימוש רק לאחרונה. ממצאי מחקר זה מבוססים על ראיונות איכותניים עם מומחים בתחום. כותבי המאמר מציינים כי באופן מפתיע, המומחים לבנייה טרומית שמו פחות דגש על Life cycle design כעל יתרון של הבנייה המודולרית. בנוסף, נמצא כי על אף הידע בקרב המומחים שבנייה מודולרית מביאה לשימוש יעיל יותר במשאבים, השימוש בבנייה מודולרית בהונג קונג הוא מועט.

Lawson et al. 2011

המאמר מתמקד במבנים מודולריים רבי קומות.

יחידה מודולרית רגילה היא בדרך כלל ברוחב 3.3-3.6 מטרים, ובאורך 6-9 מטרים. משמע, המודול בדר"כ בשטח 25-35 מ"ר. נדרשות 3-4 יח' כאלה על מנת להרכיב דירה שתשמש למגורים של משפחה (יותר מ-2 נפשות).

תיאור של פרויקט של בנייה מודולרית באנגליה: הפרויקט הורכב מ-3 בלוקים בגובה 8-25 קומות המורכבים מ-824 יח' מודולריות. גודל ממוצע של יח' מודולרית עמד על 21 מ"ר, אך המודול הגדול ביותר היה בגודל 37 מ"ר. הפרויקט התחיל ביולי 2008 והסתיים באוגוסט 2009 (59 שבועות). ההתקנה של היח' המודולריות עצמן החלה באוקטובר 2008, לאחר סיום בניית הפודיום ותשתית מבטון. המודולים שקלו בין 10 טון ל-25 טון כתלות בגודלם. חלק מההתקנה של המודולים התבצעה ע"י מנוף נייד וחלק אחר התבצע ע"י עגורן. התקנה של 824 יח' מודולריות ארכה 32 שבועות, בעוד שהצוות שהרכיב את היח' עמד על 8 פועלים ו-2 מנהלי אתר. קצב ההתקנה הממוצע עמד על 7 יח' מודולריות ליום, והכמות המקסימלית עמדה על 15 יח' מודולריות ליום. ההתקנה פר מודול עמדה על 14.5 שעות עבודה בממוצע. כוח האדם לבנייה הלא-מודולרית באתר נע בין 40 ל-110 עובדים עם 3-4 מנהלי אתר, כאשר מספר העובדים גדל בהתאם להתקדמות בפרויקט. ההערכה היא כי החיסכון בזמן בנייה לעומת בנייה קונבנציונלית בבטון עמד על 50 שבועות (45% חיסכון בזמן בנייה).

הוערך כי ייצור של מ"ר רצפה של יח' מודולרית במפעל לקח כ-7.5 שעות עבודה בממוצע עבור יח' בגודל 21 מ"ר. נתון זה לא לוקח בחשבון את העיצוב של האדריכל ויועצים חיצוניים המוסיפים כ-20% נוספים למאמץ זה. עבור יח' מודולריות ששימשו לקומות הגבוהות, משקלם הורכב מכ-14% פלדה ומ-56% בטון שברצפתם. השימוש בפלדה נע בין 67 ל-116 קילוגרם למ"ר (עבור בניינים נמוכים יותר בדרך כלל השימוש בפלדה נע בין 50 ל-60 ק"ג למ"ר). משמע, יש מרכיב פלדה רב יותר במודולים המשמשים לבנייה של קומות גבוהות ובניינים גבוהים. בסך הכול, רוב המאמץ של שעות העבודה בקרב כוח האדם בפרויקטים המודולריים הושקע באופן הבא: 36% בייצור, 9% בשינוע והתקנה, ו-

55% בבניית שאר הבניין. בנייה מודולרית חוסכת את עלויות השיפוץ וההחלפות הקטנות שלאחר סיום פרויקט שיכולות להגיע עד 2% מעלות הפרויקט.

במהלך התקנת היח' המודולריות באתר העבודה היו נעשים כ-6 משלוחים גדולים ביום, המעבירים לאתר העבודה בין 6-12 יח' מודולריות. בעת הרכבת היחידות המודולריות הוצאו פסולת מהאתר פעמיים בשבוע בפחי זבל בנפח של 6 מ"ק, ו-6 פחים בשבוע בהמשך הבנייה (כ-3,000 ק"ג של פסולת). 43% מפסולת הייצור של היח' המודולריות במפעל עברה מיחזור. הפסולת בפרויקט המודולרי הגיעה ל-5% ממשקל הבנייה הכולל. מדובר במספר קטן לעומת הבנייה הקונבנציונלית, שם הפסולת מהווה 10-13% ממשקל הבנייה הכולל.

הבטיחות באתר העבודה ובמפעל השתפרה, ואחוז תאונות העבודה המדווחות הצטמצמו ב-80% (נתון זה חשוב לחישוב הכסף שמדינת ישראל יכולה לחסוך על תשלומי קצבאות לנפגעי תאונות בניין).

מודל כלכלי של בנייה מודולרית חייב לקחת בחשבון את הגורמים הבאים: עלויות השקעה במתקן הייצור (במפעל), צמצום עלויות כתוצאה מייעילות ביצור ושימוש בחומרי בנייה שונים, נפח הייצור (כלכלת גודל), היקף הבנייה באתר העבודה, עלויות הובלה והתקנה, יתרונות במהירות ההתקנה והקטנת ועלויות תיקון מועטות.

נמצא כי העלות של מתקן הייצור (המפעל/בית חרושת שייצר את היח' המודולריות) יכולה להגיע ל-20% מסך העלות הכוללת של בנייה של פרויקט.

Olivas & Aragonéz 2013

המחברים בוחנים את הסבירות והיתרונות של שימוש במכולות משלוח משומשות לבנייה מודולרית בתעשייה כבדה. עודפי מכולות הביאו לשימוש נרחב בהן בענף הבנייה לבניית בתים, משרדים, דירות, כיתות בית ספר, מעונות, אולפנים, מקלטי חירום ועוד. מאמר זה מתמקד בשימוש שלהם בתעשייה הכבדה ובייחוד בעבור בניית חדרי חשמל וחדרי בקרה. המאמר סוקר פרויקט בנייה תוך הדגשת טכניקות הבנייה והיתרונות שלהן.

Tauš et al. 2015

המחברים בוחנים את הפוטנציאל הכלכלי של מבנים מודולריים בתחום השימוש במקורות אנרגיה מתחדשת. מאמרם בוחן היתכנות כלכלית של מצב בו מספקים חימום, קירור וחשמל למבנים מודולריים על-ידי העברה של חשמל ישירות לגופי החימום. כותבי המאמר עושים השוואה בין דרכי חימום וקירור שונים בחיפוש אחר החלופה הכלכלית ביותר:

Tab. 3. The economic energy intensity of the external system interface after transformation.

Variant	Way of transformation	Cost	Specific costs	Saving
		(€·year ⁻¹)	(€·kWh ⁻¹)	(€·year ⁻¹)
A	Electricity only (cooling and heating), electricity (other)	4 331,10	0,1305	0
B	Natural gas - heating, electricity - cooling, electricity (other)	2 308,33	0,0696	- 2 022,77
C	Heat pump - air / water (RES), electricity (other)	1 756,09	0,0529	- 2 575,02
D	District heating, electricity (other)	2 968,24	0,0894	- 1 362,86

החוקרים מראים כי האפשרות הכלכלית ביותר היא אפשרות C – שימוש במשאבת אוויר/מים לשם חימום או קירור. גם אופציה B יעילה כלכלית, אופציה המשלבת שימוש בגז טבעי לחימום ובחשמל לקירור.

Xue et al., 2017

זה מאמר נוסף הבוחן את תחום הבנייה המודולרית בסין העכשווית.

במאמר זה נמצא כי העלות של ייצור מחוץ לאתר הבנייה היא גבוהה יותר בסדר גודל של 10%-20% מבנייה קונבנציונלית. ליתר דיוק, העלות של ייצור מחוץ לאתר הייתה גבוהה יותר ב-200-300 יואן סיני למ"ר מאשר בבנייה רגילה בסין. 85% מהלקוחות דחו את הרעיון של ייצור מחוץ לאתר (ובין היתר בנייה מודולרית) בגלל העלויות הגבוהות. כתוצאה מכך, קבלנים לא לוקחים על עצמם פרויקטים של בנייה טרומית ושל בנייה מודולרית.

תמריצים כספיים שונים יושמו כדי לחסום את ההשפעה השלילית של העלות הגבוהה, כגון: הקלות מס, בונוס בדמות אישור בנייה "שטח רצפה" גדול יותר מהמדינה, מענקי מזומנים וכו'. למרות כל זאת, בנייה מודולרית עדיין נחשבת כבנייה מפוארת (fancy) ויקרה בסין. תמריצי הבנייה עזרו רק לטווח הקצר ולא עודדו קבלנים ויזמים לבנות בצורה זו באופן עצמאי.

ישנם מספר חסמים לחיסכון בעלויות בבנייה טרומית המצוינים במאמר. ראשית, יש להבין ממה מורכבת העלות הכוללת: עלות החומרים, עלות כוח האדם, עלות המכונות במפעל, עלות הקמת המפעל, עלות הניהול ועלות העיצוב. אז אילו מהעלויות הנ"ל הן אלה המקפיצות את העלות הכוללת? מחד, נמצא כי יש עלות נוספת להכשרת כוח האדם במפעל הייצור, מעבר להכשרת כוח האדם באתר העבודה עצמו. עלות זו נובעת מכך שמדובר בתחום חדש ולא מפותח באופן יחסי, המצריך הכשרה מיוחדת לעובדים. מאידך, ישנו חיסכון בעלויות כתוצאה מכלכלת גודל: סטנדרטיזציה של הבנייה מביאה להתמקצעות של העובדים, מה שמביא בקיטון העלויות של כוח האדם. בנוסף, 93% מהקבלנים דיווחו כי הם נהנו מחיסכון עלויות שנבע מהתקשרות טובה יותר בין אדריכלים לקבלנים, המאפיינת את הבנייה הטרומית. ממצא מעניין מהמאמר הוא שעלות של בנייה טרומית במפעלים בבעלות המדינה הייתה יקרה ב-10% מבנייה מסורתית, בעוד שהעלות של בנייה טרומית במגזר הפרטי הייתה יקרה רק ב-2%.

Hong Et al., 2018

מציג את בעיית העלות הגבוהה יותר של בנייה טרומית ומודולרית אל מול בנייה קונבנציונלית בסין. לפי כותבי המאמר, המכשול העיקרי לבנייה מודולרית בסין כיום, זה העלות הגבוהה. לכן בתחילת הטמעת הבנייה המודולרית, בנוסף לעלויות הייצור, הבנייה, השינוע והתשלום לכוח אדם, מתווספות עלויות ליועצי חוץ בתחום הבנייה המודולרית (אדריכל, מהנדס). להלן מצורפת רשימה של מרכיבים שעלותם יקרה יותר אל מול מרכיבים שעלותם זולה יותר בבנייה מודולרית לעומת בנייה קונבנציונלית:

Table 1

Factors influencing the economic performance of the precast construction.

	Influence factor
Higher cost	Highly skilled workers Complex techniques Complex design Additional procurement costs High initial cost (cost on new machinery, fabricate molds, and factories) Extra labor cost on checking, counting, and sorting raw materials Occupying extra space for accommodation of precast components Additional transportation costs Additional use of tower cranes (vertical transportation)
Lower cost	Increased productivity Decreased labor Avoidance of construction site hindrances Cheaper labor rates Decreased management cost Faster project delivery Minimal wastage Less site materials Reduction of formwork Controlled quality Lower maintenance and repair expenses

כותבי המאמר משווים בין מספר מבנים מודולריים בעלי מבנה ושלד דומים, מה שמקל על השוואה. הטבלה הבאה מציגה תיאור קצר של 8 מבנים מודולריים תוך פירוט של העלות הכוללת של כל אחד מהבניינים יחד עם תיאור השטח של מרכיבי הבניינים:

Table 3

Building profiles of the eight sample buildings.

	Unit	Sichuan			Shanghai		Shenzhen			
		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
Building basic information	Building type	R	R	R	R	R	R	R	R	
	Structure	FSS	FSS	FSS	FSS	FSS	FSS	FSS	FSS	
	Gross floor area	m ²	7770	6890	38,352	9467	7039	28,522	13,600	8000
	Total cost	Million yuan	15.8	16.6	61.7	19.1	14.8	43.9	40.3	38.1
Prefabrication technology	Volume of prefabrication	m ³	933	1250	2891	1089	804	1740	2312	2080
	Precast rate	%	41	59	20	40	44	15	40	60
	Precast facade	m ³	850	769	0	0	415	1296	1195	1127
	Precast form	m ³	0	0	0	811	0	0	229	0
	Semi-precast slab	m ³	0	401	2240	0	265	0	563	574
	Precast balcony	m ³	28	55	498	167	74	301	138	82
	Precast staircase	m ³	32	26	153.4	89	36	142	187	297
	Precast air condition panel	m ³	24	0	0	22	7	0	0	0

במאמר ניתן למצוא עלויות ביואן של מרכיבי הבניינים. כך לדוגמא, הטבלה הבאה מציגה את העלות של כוח אדם, עלות ההרכבה, עלות תחזוקה, עלות גימורים ועלות שינוע של כל אחד ממרכיבי הבניין כגון מרפסות, גרם מדרגות, פסדת (חזית) הבניין ועוד.

Table 4
Decomposition of the basic cost for six prefabrications.

	Unit	Precast facade	Precast form	Semi-precast slab	Precast balcony	Precast staircase	Precast air condition panel
Thickness	mm	180	85	70			
Concrete	m ³	0.9	0.98	0.84	0.84	0.84	0.84
Steel	kg	131	119	152	285	133	161
Embedded part	kg	142	121	0	31	11	25
Template use	yuan	128	247	300	95	224	95
Labor cost	yuan	544	770	783	439	439	439
Construction machine use	yuan	24	52	57	22	22	22
Maintenance	yuan	49	97	114	50	50	50
Finish protection	yuan	30	64	71	20	20	20
Transportation	yuan	207	437	214	180	202	180
Profit and tax	yuan	639	776	628	643	463	486

נמצא כי בניינים מודולריים עולים סדר גודל של 17%-2% יותר מבנייה קונבנציונלית, בסך הכל. העלות עבורם נעה בטווח בין 372 יואן למ"ר ל-1,028 יואן למ"ר. ניתן לדרג את הגורמים שהכי משפיעים על העלות הכוללת של פרויקטים בבנייה טרומית/מודולרית: חומרים – פלדה ובטון (30%-55% מהעלות הכוללת), כוח אדם (14%-24%), שינוע (6%-11%). עם זאת, כותבי המאמר מציינים גם שמבנים שנבנו בייצור טרומי היו גבוהים יותר ב-72%-26% מהבניינים הקונבנציונליים. הטבלה הבאה מציגה את שיעורי הפסולת המיוצרת בתהליך הבנייה.

Table 6
Wastage rate of typical building material.

	Conventional construction			Prefabrication
	Blengini (2009)	Poon et al. (2001)	Tam et al. (2007)	
Concrete	7%	3–5%	4–7%	0.5–3.5%
Steel bar	7%	1–8%	3–8%	0.2–4%
Timber	7%	5–15%	4–23%	0.6–12%
Block/brick	10%	4–8%	5–8%	0.6–4%

יש לשים לב כי המאמר מתייחס לסיין, שם יש מחסור במומחים בתחום הבנייה המודולרית ומחסור בניסיון מקצועי בתחום הזה. כיוון שישיראל דומה מבחינה זו לסיין, המאמר רלוונטי לענייננו.

Peltokorpi et al. 2018

המחברים מנסים לפתח מסגרת לזיהוי ומיון אסטרטגיות מודולריזציה בבנייה תוך בדיקת מידת התאמתן של אסטרטגיות אלו למטרותן המקורית. המאמר מבוסס על 9 מקרי בוחן. ממצאי המחקר מראים כי בנייה מודולרית יכולה להיות מתאימה עבור מי שמחפש פתרונות עיצוב חדשניים; לשפר את איכות הפרויקט, להוזיל עלויות ולקצר זמני פרויקט; ולאפשר גמישות בתחזוקת בניין.

א-9.1. מראי מקום

Hofman, E., Voordijk, H., & Halman, J., 2009, "Matching supply networks to a modular product architecture in the house-building industry". Building research & information, 37(1), p31-42.

- Hong, J., Shen, G. Q., Li, Z., Zhang, B., & Zhang, W., 2018, "Barriers to promoting prefabricated construction in China: A cost–benefit analysis". *Journal of cleaner production*, 172, p649-660.
- Jaillon, L., & Poon, C. S., 2010, "Design issues of using prefabrication in Hong Kong building construction". *Construction Management and Economics*, 28(10), p1025-1042.
- Lawson, R., & Ogden, R., 2005, "Developments in pre-fabricated systems in light steel and modular construction". *Transport*, 35(15), p15.
- Lawson, R. M., Ogden, R. G., & Bergin, R., 2011, "Application of modular construction in high-rise buildings". *Journal of architectural engineering*, 18(2), p148-154.
- Olivas, F., & Aragonéz, O., 2013, "Plug and play—Modular building solutions to reduce lead time, cost and increase flexibility". In *2013 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference* (pp. 1-14). IEEE.
- Peltokorpi, A., Olivieri, H., Granja, A. D., & Seppänen, O., 2018, "Categorizing modularization strategies to achieve various objectives of building investments". *Construction Management and Economics*, 36(1), p32-48.
- Rogan, A. L., Lawson, R. M., & Bates-Brkljac, N., 2000, "Value and benefits assessment of modular construction". Steel Construction Institute, Ascot, UK.
- Tauš, P., Taušová, M., Šlosár, D., Jeňo, M., & Koščo, J., 2015, "Optimization of energy consumption and cost effectiveness of modular buildings by using renewable energy sources". *Acta Montanistica Slovaca*, 20(3).
- Xue, H., Zhang, S., Su, Y., & Wu, Z., 2017, "Factors affecting the capital cost of prefabrication – A case study of China". *Sustainability*, 9(9), 1512.

א-10. יישום BIM בתהליכי הבנייה

Lu and Korman 2010

המחברים מדגישים שהכנת מודלים מתוכננים באמצעות כלי עזר ממוחשבים לשרטוט מסוג קאד (CAD) מדגמת את הגיאומטריה של הבניין וחלקיו, בעוד שמערכות BIM כוללות מידע מפורט על האובייקטים המשולבים במודל. מידע זה מגוון מאוד, ובנוסף למידות וצורה גיאומטרית יכול לכלול תכונות רבות ושונות, כגון: פקטורים פיסיקליים הדרושים לתכן (למשל: התנגדות תרמית, עמידות אש, כושר הפרדה אקוסטי), מיקום, ספקים אפשריים, תכונות פונקציונליות (למשל: מרווחי התקנה, אופן הפעלה, ותחזוקה), נקודות תורפה, דרישות בדיקה ועוד. בשל תכונותיה אלה מערכת BIM מאפשרת שיתוף מידע בתכנון בצוות הרב תחומי הפעיל בה בעת בתכנון ובביצוע של בנייה מודולרית, ומקלה על הברור של תיאום בין חלקים ומערכות שונים ומניעת קונפליקטים. מערכת BIM מאפשרת דיגום תלת ממדי של תהליך הביצוע. על אף ההצטרפות של המחברים שמערכת BIM מתאימה לבנייה מודולרית, שלוש הדוגמאות שהם מביאים לא כוללות בנייה כוללת מסוג זה ורלוונטיות רק לתכנון של היחידות המודולריות עצמן.

Moghadam et al. 2012

המאמר מתאר מערכת ממוחשבת לתכנון והמחשה של תהליך ההרכבה של בניין הנבנה בשיטת היחידות התלת ממדיות. הפירוט הוא בפסקי זמן של דקה. המאמר מציג את היישום (התיאורטי) של המערכת עבור הבניין Dean461 בברוקלין ניו-יורק (בניין בן 34 קומות בברוקלין שהקמתו תוכננה ל-56 ימי עבודה, אך בעיות שונות גרמו לעיכובים – ראה מקרה בחן אחרון בתת-פרק א-13 של סקר הספרות).

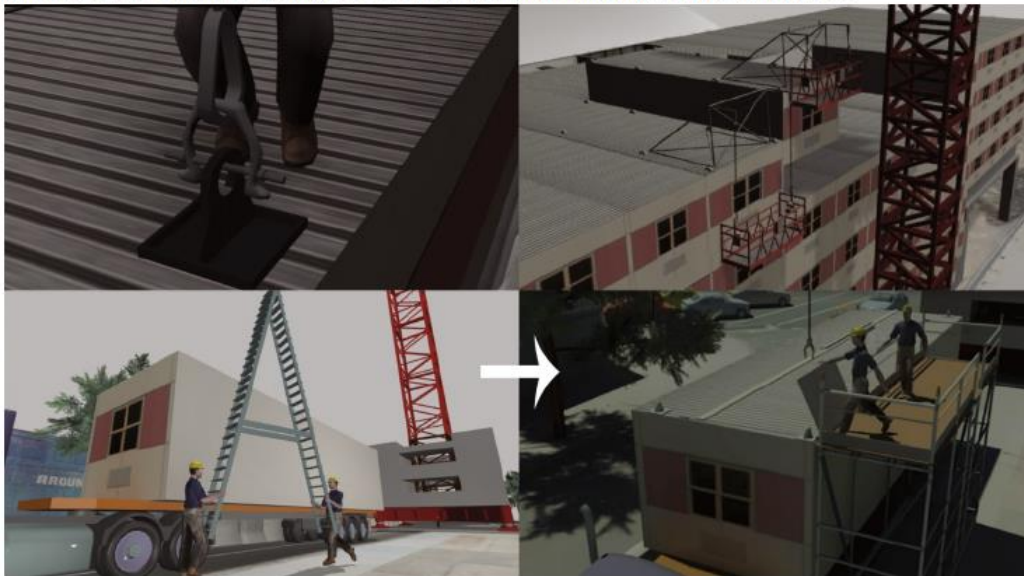
דוגמא לרמת הפירוט של תוצרי התוכנה:

Table 4. Typical construction schedule for onsite module installation (Module No. 1 Level floor 2).

Activity description	Location	Dependency	Time (min)			Cumulative (average min)
			Pessimistic	Average	Optimistic	
Trailer at loading zone with module	Lifting zone		10	8	6	0
Unwrap module	Lifting zone	1FS	10	8	6	0
Hook-up module	Lifting zone	2FS	12	10	8	10
Lifting Inspection	Lifting zone	3FS	7	5	4	15
Load module – hoist up	Air	4FS	2.81	0.81	0.81	15.81
Swing module	Air	5FS	0.7	0.5	0.3	16.31
Fold tarps	Lifting zone	3FS	7	5	3	16.31
Return trailer to loading zone	Drop zone	5SS	10	8	6	16.31
Hoist down module	Air	6FS	0.7	0.5	0.3	16.81
Align module and survey final location	Building	9FS	22	19	16	35.81
Bolt and weld module to structure	Building	10FS	23	20	17	55.81
Fireproofing partition walls	Building	10FS	15	13	11	55.81
Inspect installation	Building	11FS,12FS	7	6	5	55.81
Unhook module	Building	10FS	2	1	1	55.81
Swing back to loading zone	Air	14FS	1.5	1	0.5	55.81
Hoist down main line	Air	15FS	1.24	0.24	0.30	55.81
Module installation cycle time			68.21	55.81	46.41	55.81

Note: Module weight: 27 196 lbs (12 ton).

Fig. 5. Evaluation of construction operation scenarios: (a) proposed pop-rivet system for connections and lifting of modules, (b) use of scissor folding to increase project productivity, and (c) proposed safety regulation led to a higher labours' working pace.



Ramaji and Memari 2015, Ramaji and Memari 2016, Ramaji et al. 2017, Ramaji and Memari 2018

ארבעת המאמרים עוסקים באותו מחקר, כאשר חלק ניכר של המידע חוזר בארבעתם, ותוספת המידע משנה לשנה מועטה יחסית. כמוטיבציה לביצוע המחקר, המחברים טוענים שבנייה מודולרית כרוכה בתהליכי תיאום תכנון מורכבים שחייבים להתבצע בשלב מוקדם של התכנון, ובהיעדר מערכות BIM המתאימות לבנייה מסוג זה קידומה מעוכב. המאמרים מוקדשים לפיכך למחקר שהם בצעו במסגרתו פתחו קונספט כוללני והציגו את התכונות הדרושות מחלקיה השונים של מערכת BIM מתאימה לבנייה מודולרית, תוך התייחסות לשלבים הראשונים בתהליך התכנון (תכנון וייצור היחידות במפעל, תכנון הבניין השלם במשולב עם היחידות המדולריות). יחד עם זאת, המחברים לא המשיכו את הפיתוח

לשלבם הבאים (שינוע, הרכבה, חיבורים מסוגים שונים, עבודות הגמר בבניין, תזרים מזומנים, בדיקות בעת מסירה, וכדומה).

Lee and Kim 2017

המחברים טוענים שאף על פי שמשך הביצוע באתר של פרויקט בבנייה מודולרית מתקצר מאוד, העבודה העיקרית מתרכזת במפעל ותכנון לא יעיל של התהליכים במפעל עלול להכשיל את לוח הזמנים הכולל. לכן הם התמקדו ביישום BIM בתהליך הייצור במפעל. המאמר מציג פיתוח מפורט של מערכת BIM עבור תהליך הייצור של יחידות מודולריות במפעל, הכוללת מידול של התהליכים הפיסיים, החומרים והרכיבים השונים, מכלול תהליכי הביצוע במפעל על כל שלביהם, פרטי הציוד במפעל ותפעולו בתהליך הייצור, לוח הזמנים, העלויות, והיבטי דיוק ואיכות. התמונה המצוטטת מדגימה מידול של מנשק ציוד-חומרים.

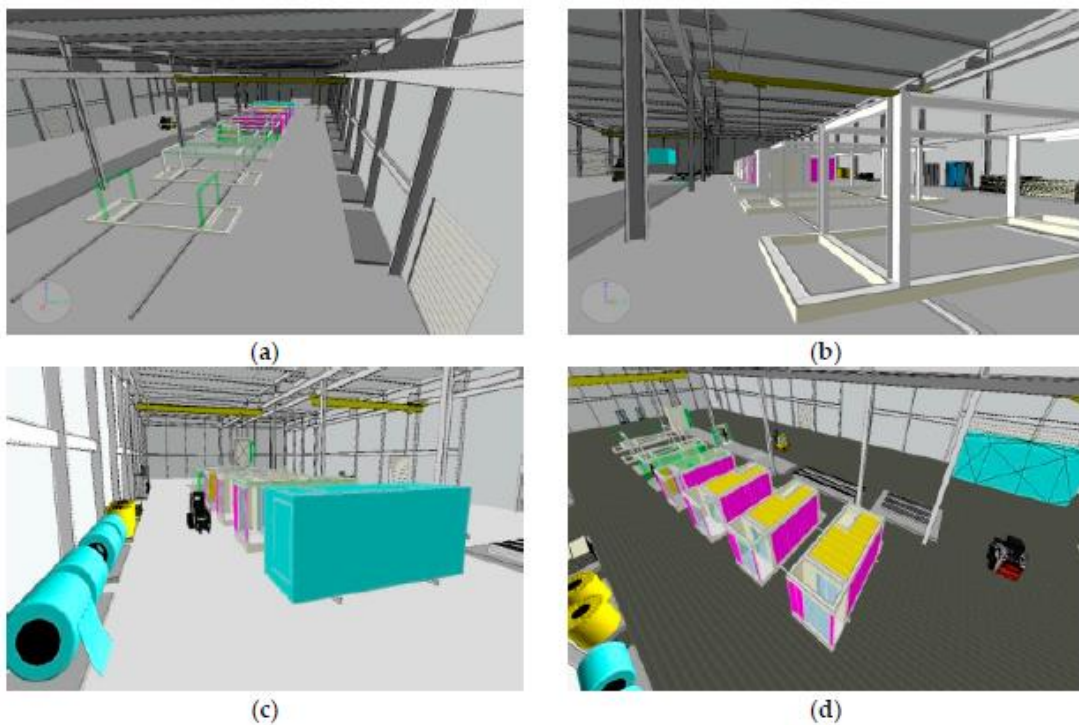


Figure 4. Module-factory-equipment-material combined model (nwd): (a) View 1; (b) View 2; (c) View 3; and (d) View 4.

א-10.1. מראי מקום

Lee, J., Kim, J., 2017, "BIM-Based 4D Simulation to Improve Module Manufacturing Productivity for Sustainable Building Projects". Sustainability 2017, 9, 426, doi:10.3390/su9030426.

Lu, N., Korman, T., 2010, "Implementation of Building Information Modeling (BIM) in Modular Construction: Benefits and Challenges".

- Moghadam, M., Alwisy, A., Al-Hussein, M., 2012, "Integrated BIM/Lean Base Production Line Schedule Model for Modular Construction Manufacturing". Construction Research Congress 2012 © ASCE 2012, 1271-1280.
- Ramaji, I.J., Memari, A.M., 2015, "Information Exchange Standardization for BIM Application to Multi-Story Modular Residential Buildings". AEI 2015, ASCE, p13-24.
- Ramaji, I.J., Memari, A.M., 2016, "Product Architecture Model for Multistory Modular Buildings". J. Constr. Eng. Manage., 2016, 142(10): 04016047
- Ramaji, I.J., Memari, A.M., Messner, J.I., 2017, "Product-Oriented Information Delivery Framework for Multistory Modular Building Projects". J. Comput. Civ. Eng., 2017, 31(4): 04017001.
- Ramaji, I.J., Memari, A.M., 2018, "Extending the current model view definition standards to support multi-storey modular building projects". Architectural Engineering and Design Management, VOL. 14, NOS. 1–2, 158–176.

א-11. היבטים רגולטוריים

EOTA 2006

הארגון האירופאי לאישורים טכניים, EOTA, מכין מסמכים לפיהם בודקים טכנולוגיות ושיטות בנייה שאינן מכוסות ע"י התקינה הבינלאומית הרגילה מהסוג של ISO או התקינה המקומית במדינות השונות. מסמכים אלה מסומנים כ- ETAG (European Technical Assessment Guideline). בשנת 2006 הוכן מסמך כזה עבור בנייה מתועשת של יחידות תלת ממדיות:

ETAG 023 "GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF PREFABRICATED BUILDING UNITS", 2006.

המדריך עוסק בכל ההיבטים התפקודיים של יחידות תלת ממדיות מתועשות ומוגמרות במפעל, אך הוא חל גם על יחידות מתועשות שרק השלד שלהן מושלם במפעל, ויתר החלקים ייתכן ויורכבו באתר. המסמך חל על יחידות שנועדו לבניית בנייני קבע תוך התייחסות לאורך חיים אפקטיבי של 50 שנה לכל מערכות השלד והבנייה ו- 25 שנה למערכות הגמר כגון חיפויי חזית, ציפויי גג, חלונות ודלתות. המסמך אינו חל על בתים יבילים המורכבים על מנשא עם גלגלים.

פרק 4 במדריך כולל את דרישות התפקוד החלות על היחידות במכלול ההיבטים התפקודיים (יציבות וחוזק, בטיחות בזמן שריפה, בריאות המשתמש כולל מניעת רטיבות, בטיחות המשתמש, תפקוד אקוסטי, תפקוד אנרגטי, קיים ושמישיות. פרק 5 קובע את שיטות הבחינה לעמידות בדרישות הנקובות בפרק 4. פרק 6 מפרט בצורה מעמיקה יותר כיצד יש לבדוק ולוודא עמידות במכלול הדרישות. פרק 7 מציג הנחות יסוד עליהן מתבסס המסמך. יתר הפרקים עוסקים בתכנים ובצורה של האישור הניתן (ETA – European Technical Assessment) על ידי גוף הבדיקה. שיטת בנייה שנבדקה בגוף בדיקה מאושר לכך במדינה כלשהי באירופה ונושאת ETA, נחשבת מתאימה לשימוש בכל מדינות הקהילה האירופאית.

MODCONS D6.9 2015

בפרויקט האירופאי MODCONS מתייחסים לבנייה גבוהה עם יחידות תלת ממדיות בשיטת Future Form. בשיטה זו שלד היחידה מבוצע מפרופילי פלדה מעורגלים בקר, ומחופה בלוחות חיפוי דקים. הביצוע במפעל כולל את כל הכלים והמערכות שבתוך היחידה, בידוד תרמי ואקוסטי, ואיטום חיצוני מלא של היחידה. המעטפת החיצונית והגג של הבניין השלם מותקנים באתר, כמו גם החיבורים והקישור של מערכות היחידות למערכת הכללית של הבניין.

צוות הפרויקט סקר את מערכת התקינה האירופאית ובחן האם טכנולוגיה זו יכולה לעמוד בדרישות המחייבות במדינות השונות והגיע למסקנות הבאות:

- המערכת של תקני היורוקוד 1, 3, ו- 8 מתאימים ומספיקים לתכן הקונסטרוקציה.

- הביצוע מכוסה חלקית בלבד בתקנים EN 1090-2, ו- EN 1090-4. המחברים לא מציינים מה חסר בתקנים אלה, ואיך אמורים להתייחס לנושאים שלא מופיעים בהם.
- חומרים ורכיבים מכוסים היטב על ידי התקינה ויש להשתמש אך ורק בחומרים ורכיבים המסומנים כמתאימים לתקינה (ע"י סימון ה- CE כנדרש באירופה).
- לא ניתן להצביע על תקן המאפשר בדיקה של שיטת בנייה פרטנית בשלמותה. אבל קיימים שני מסמכי ETAG המתאימים לבדיקה של שיטות מסוג זה: ETAG 23 – Prefabricate Building Units (EOTA 2006), ו- ETAG 25 – Metal Frame Building Kits (EOTA 2006).
- כדי להבטיח את הקיים של מבנה היחידה יש להתקין את הבידוד התרמי מחוץ למבנה הפלדה ולהשתמש בפלדה מגולוונת ברמות מינימליות של Z275, או AZ150 כהגדרתן בתקן האירופאי EN 10346.
- יתר הנושאים (כגון: מניעת התפשטות אש, עמידות אש, הפרדה אקוסטית, בידוד תרמי, איטום לאוויר, וכו') מכוסים היטב על ידי התקינה ושיטות הבנייה צריכות ויכולות לעמוד בדרישות התקניות.

צוות המחקר לא מציין תקנים או דרישות רגולטוריות המהווים חסמים ליישום טכנולוגיות מסוג זה.

BCAC – IBC Chapter 31

בעת ביצוע מחקר זה נמצא בהכנה בארה"ב קוד בנייה עבור השימוש במכולות לבנייה למגורי קבע. הצעת הקוד נחשפה להערות באוקטובר 2017.

באופן כללי ההצעה בנויה על פי מתכונת הנושאים הרגילה של קודי הבנייה של ICC, ועבור כל נושא היא מפנה לסעיפים הרגילים של הקוד הרלוונטי, קרי: עבור בניינים גבוהים ההצעה מפנה לקוד של בניינים גבוהים, בעוד שעבור בניין בודד היא מפנה לקוד של בנייה נמוכה או נוקטת עמדה נקודתית וקובעת דרישות מינימום מקלות. כמו כן כוללת הצעת הקוד ערכי חוזק מותר רלוונטיים לחומרים מהם עשויה המכולה.

Monash University 2017

מדריך זה כולל פרק המבהיר את הקשר בין ההנחיות שבו לתקנות הבנייה באוסטרליה. היות שהתקנות הללו הן תפקודיות בעיקרן, מודגש שלמעשה כל ההנחיות שבמסמך נגזרו מהן, והמסמך רק מבהיר את כללי התכן הנובעים מהן. במהלך הכנת המסמך לא נמצאו תקנות שלא ניתן לעמוד בדרישותיהן, ולמעשה הנושא הרגולטורי לא נתפס כגורם המהווה חסם כלשהו לבנייה מסוג זה.

נושא נוסף המופיע במדריך זה, הקשור בעקיפין להיבט הרגולטורי, הוא נושא בקרת ואבטחת האיכות. בהקשר זה המחברים התלבטו לגבי סוג, רמה ועיתוי של הבדיקות הנדרשות בשל החשש לחוסר בהירות לגבי חלוקת האחריות בין המתכננים, יצרן, משנעים ומרכיבים. ההצעה שלהם מבוססת בטבלה המצוטטת:

Table K1 – Modular Construction suggested Hold Points

Hold Point	Verification Required
Prior to commencement of detailed design	<ol style="list-style-type: none"> 1. Compliance with Safe Design of Structures provisions regarding foreseeable hazards and consultation. 2. Compliance with NCC Performance Requirements as solutions are proposed.
Prior to commencement of manufacture	<ol style="list-style-type: none"> 1. Regulatory certification of design or approval permits. 2. Compliance with NCC Performance Requirements as materials or systems are procured. 3. Preparation of a manufacturing or construction Method Statement. 4. Verification by suppliers of material conformance.
Prior to commencement of high-value additions (e.g. specialist services or subcontracts)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Confirmation regarding acceptable existing module conditions (e.g. interior finishes, plant and equipment).
On completion of regulated works (e.g. plumbing, electrical)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Regulatory certification as required.
Prior to transport from factory	<ol style="list-style-type: none"> 1. Regulatory certification of inspection (including regulated works). 2. Compliance with the Heavy Vehicle National Law. 3. Confirmation of acceptable existing module conditions.
Prior to export	<ol style="list-style-type: none"> 1. Confirmation of acceptable existing module conditions. 2. Confirmation of required export and security approvals.
Prior to forwarding after importing	<ol style="list-style-type: none"> 1. Confirmation of acceptable existing module conditions
Prior to erection	<ol style="list-style-type: none"> 1. Confirmation of acceptable existing module conditions. 2. Confirmation of fit-up of inter-modular connections for structure, services and temporary works for staging.
During/After the installation	<ol style="list-style-type: none"> 1. Confirmation of acceptable existing module conditions. 2. Confirmation of fit-up of inter-modular connections for structure (including any additional/external attachments onto the modular building) prior to covering up and services.

מראי מקום 11.1-א

BCAC – IBC Chapter 31, 2017, " Intermodal Shipping Containers Draft Code Change Proposal". USA International Code Council.

EOTA, 2006, "ETAG 023 - GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL OF PREFABRICATED BUILDING UNITS". The EUROPEAN ORGANISATION FOR TECHNICAL ASSESSMENT.

MODCONS D6.9, 2015, "Report on conformity of developed systems with regulatory requirements". FP7-SME-2012-1 GRANT AGREEMENT N° 315271 MODCONS DEVELOPMENT OF MODULAR CONSTRUCTION SYSTEMS FOR HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS.

Monash University, 2017, "Handbook for the Design of Modular Structures". Monash University, Modular Construction Codes Board.

א-12. מקרי בוחן

Cartz and Crosby 2007

מתארים את פרויקט Paragon בלונדון. הפרויקט כולל 4 בניינים בני 5 עד 17 קומות למעונות סטודנטים ועובדים שכללו 839 חדרי סטודנטים ו- 221 דירות עובדים. הפרויקט נמסר לתכנון בראשית 2005 ודרישת האוניברסיטה הייתה שבספטמבר 2006 הוא יהיה כבר מאוכלס. לוח הזמנים הקצר וסביבת האתר הצפופה גרמו להחלטה לבצע את הבניינים בבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל.

האדריכלים, מהנדסי הקונסטרוקציה ומהנדסי המערכות של הבניינים עבדו בשיתוף פעולה מתמיד ובצמוד למהנדסי המפעל שייצר את היחידות ובאופן זה הצליחו לסיים את התכנון והתכן המפורט בלוח זמנים קצר. כדי לאפשר התקדמות שוטפת של הרכבת היחידות העשויות פלדה יחד עם היציקה של גרעין הבטון, ולמנוע התפתחות מאוחרת בהמשך של סדקים וקריסה במערכות גמר עקב הצטמקות זחילה של הבטון, המחברים כללו אפשרות תנועה אנכית בין הגרעין לבין היחידות המתועשות. דגש מיוחד ניתן להתאמת דרגות הדיוק של ביצוע מערכת היסודות ופרטי החיבור כדי למנוע ככל האפשר אקסצנטריות בהעברת הכוחות האנכיים.

הפרויקט כלל 21 סוגים שונים של יחידות, כאשר כל יחידה יוצרה במפעל תוך 20 יום. ההרכבה של יחידה נמשכה יום אחד ויתר העבודות דרשו עוד 2 ימי עבודה, כולל ריהוט וכו'. בתחילת הפרויקט הורכבו 8 יחידות ליום, אך עם רכישת הניסיון, הקבלן הצליח להגיע לכ- 15 יחידות ליום.



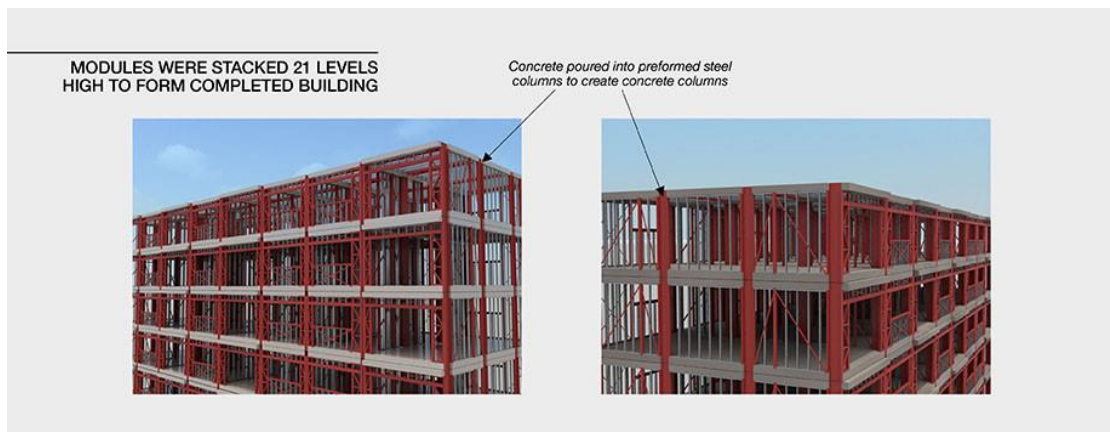
Project:
Paragon Mixed Use
Development
Location:
West London
Client:
Berkeley First
Modular Contractor:
Caledonian Building
Systems
Caledonian Engineer:
Alan Wood & Partners
Client Engineer:
Capita Symonds
Architect:
Carey Jones
Project Value:
£100 million



Gardiner 2015

מתאר את בניין SOHO בדארווין אוסטרליה.

29 קומות, בהן מרתף ושמונה קומות בבנייה קונבנציונלית מבטון ו- 21 קומות באמצעות יחידות מודולריות תלת ממדיות שיוצרו בסין והובלו לאוסטרליה. היחידות חוברו לגרעין מרכזי מבטון. כל יחידה כללה רצפת בטון קל (1600 ק"ג למ"ק) ועמודי תבנית חלולים מפלדה לתוכם נוצק בטון באתר. הבניין תוכנן קונבנציונלי, אך בשל מחסור בכוח אדם היזם/קבלן החליט להמיר את 21 הקומות ביחידות המתועשות. השיטה הטכנולוגית נבחרה כדי להישאר צמוד ככל האפשר לתכנון המקורי ולהימנע מהצורך בהגנה בפני אש של רכיבי השלד העיקריים.



HTA 2015

חברת התכנון הבריטית HTA הכינה מסמך המציג פרויקטים שנבנו בבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות מוגמרות במפעל על מנת לשכנע שטכנולוגיה זו מתאימה לבנייה של סוגים שונים של בניינים בבנייה לגובה.

הדוגמאות במסמך כוללות תמונות ועובדות בסיסיות וחלקיות בלבד, שמוצגות לכל פרויקט באופן שונה (כגון: גודל הפרויקט, גובה, מספר קומות, שנת ביצוע, וכד'). המסמך לא כולל שום פירוט טכני של מקרי הבוחן.

Generalova et al 2016

מתארת מספר שיטות בנייה ופרויקטים.

דוגמה מס. 1: חברת Board Group (סין)

יחידות מפלדה עם כל המערכות, הגימורים וההכנות להתחברות, כולל מיזוג ואוורור מרכזי. החברה בנתה בשיטות מתועשות שונות כ- 30 בניינים, כולל בניין בית מלון בן 30 קומות שנבנה ב 15 ימים (בשיטה של שלד פלדה, תקרות דאבל-דק, ופנלי קיר גדולים). בשיטת היחידות המודולריות התלת ממדיות התכונה לבנות בניין בן 202 קומות בצ'אנגשה ולסיים את הקמתו תוך 90 יום. הבנייה הופסקה ע"י השלטונות בשנת 2013, לאחר תחילת העבודות בשטח, בגלל התנגדויות להקמת גורד שחקים במיקום הנדון, ועל אף תחילת העבודות לא התחדשה מאז.

דוגמה מס. 2: מפעל OBD (רוסיה)

מציינת שיישום בנייה מודולרית תלת ממדית בבנייה לגובה החלה לראשונה בברית המועצות בשנות ה-70 של המאה הקודמת. מפעל OBD קיים מאז עד היום. הוא מייצר כ- 50 יחידות תלת ממדיות מבטון ביום. רוחב 3.4 מ', אורך 6.0 מ'. בונים בניינים בני 16 קומות. החזיתות לא השתנו לאורך השנים והמראה חדגוני. הבנייה מהירה במיוחד, והם מסיימים בניין בן שלוש כניסות בחודש אחד. חברה אחרת, VYBOR-OBD, מנסה להתגבר על החדגוניות באמצעות חיפוי באתר באמצעות חזית מתכתית מאווררת, כמו בתמונה:



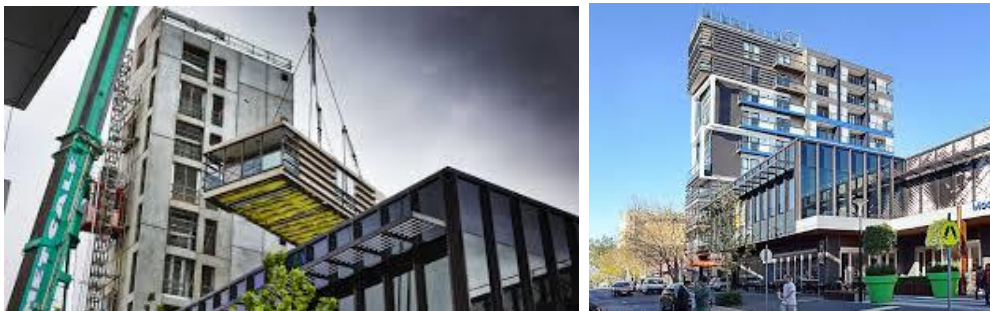
בשני המקרים הגימור הסופי והמערכות מותקנים בתום ההרכבות.

דוגמה מס. 3: 461 Dean Street (ברוקלין ניו יורק)

בניין בן 32 קומות עם 930 יחידות מפלדה (הנמצא בתחילת בנייה בעת כתיבת המאמר – ראה תיאור המפורט כמקרה בחן אחרון בתת-פרק זה). 363 דירות קטנות מסוגים שונים (סטודיו, 2 חדרים, ו-3 חדרים). 50% של הדירות מיועדות להשכרה למעוטי יכולת. היחידות מחוברות לשלד פלדה עם חיזוקים אלכסוניים. קצב הייצור הוא 4 יחידות ליום. קצב הבנייה קומה מוגמרת לשבוע. היחידות הן ברוחב גדול, עד 4.57 מ', ובאורכים משתנים מ- 6.1 מ' עד 15.24 מ'.

Boafo et al 2016

המאמר כולל תחילה סקירה תמציתית של היסטורית התיעוש, תוך הדגשת היתרונות המצופים לפי סקרים סטטיסטיים: שיפור איכות ובטיחות הבנייה, והפחתה של כוח אדם באתר הבנייה, משך הביצוע הכולל באתר, עלות כוללת של הפרויקט, פסולת בניין, רעש ואבק באתר הבנייה, והשפעה השלילית על הסביבה. בהמשך מתוארות בקצרה טכנולוגיות תיעוש שונות, עם דגש על בנייה מודולרית המבוססת על יחידות תלת ממדיות המיוצרות בשלמות במפעל, המיוצגת ע"י בניין One9, בן 9 קומות שנבנה ע"י חברת UB – Unitised Building (אוסטרליה) מגרעין מבטון טרום ו-36 יחידות תלת ממדיות מקונסטרוקציית פלדה עם מעטפת קלה מוגמרות לחלוטין במפעל. הבניין הושלם ב-5 ימי עבודה באתר.



יתר המאמר עוסק בהיבטים של התפקוד הפיסי של בנייה מתועשת.

Oh et al 2017

מתאר פיתוח תיאורטי של מערכת מודולרית עם יחידות תלת ממדיות, המובאות לאתר כשהן מתועשות חלקית בלבד על מנת לאפשר ניצול נפח היחידות לצורך שינוע של כמות גדולה יותר של מרכיבים בבת אחת. אין במאמר תיאור של מערכת שבוצעה בפועל בשיטה זו.

MODCONS Case Studies

במסגרת הפרויקט האירופאי MODCONS סקרו 8 מקרי בוחן, הכוללים רק 4 פרויקטים של בנייה שאינה נמוכה. להלן תמצית הסקירה של פרויקטים אלה:

Future Form – Citizen M, London

חברת CitizenM הדנית החלה את פעילותה בשנת 2007 ומבססת את כל בתי המלון שהיא בונה ברחבי העולם על בנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות.

במסגרת פרויקט MODCON כללו סקירה של מלון בן 6 קומות בלונדון, הכולל 192 חדרים, בשיטה המבוססת על יחידות מודולריות תלת ממדיות. הבניין נבנה ע"י חברת Future Form מ-95 יחידות מודולריות ברוחב 2.5 מ' ואורך של 15 מ', הכוללות שני חדרים ומסדרון, ועוד יחידות מודולריות בודדות הכוללות חדר יחיד, ויחידות מודולריות של מהלכי מדרגות ומעליות. הקומה התחתונה, הכוללת את החלקים הציבוריים והאדמיניסטרטיביים של המלון, בנויה משלד פלדה הנושא את היחידות המודולריות מעליו. עובי הקירות הכולל הוא 20 ס"מ ועובי כולל של תקרה + רצפה הוא 40 ס"מ. החזיתות נבנו באתר ממבנה פלדה וזכוכית המבוסס על פרופילי RHS 80X40, אשר נועד לקבלת הכוחות האופקיים ולחיבור היחידות המודולריות. המבנה התחתון הוא על רשת של 5X6 מ', כך שכל קורה נושאת שתי יחידות מודולריות. משקל היחידה היה כ-10 טון. קצב הבנייה היה כ-6 יחידות בממוצע ליום. החדרים היו גמורים לחלוטין במפעל, בעוד שהחיפוי הסופי של המסדרונות בוצע באתר אחרי השלמות של חיבור מערכות השירות. משך הפרויקט כולו היה 9 חודשים, כאשר הרכבת היחידות ארכה רק 5 שבועות. ההערכה היא שסך הכל נחסכו 6 חודשי ביצוע. הפרויקט דורג "טוב מאוד" ע"י BREEM (ציון בנייה ירוקה), ובדיקות הראו רמת איטום לאוויר גבוהה מאוד (לעומת בנייה קונבנציונלית) והפרדה אקוסטית של 60 דציבל בין החדרים. המרכיב המודולרי (תכנון וביצוע) היווה 35% מעלות הפרויקט, שעמדה על 14 מיליון לירות סטרלינג.



בשלב זה (מאי 2018) החברה בונה מלון בן 20 קומות בניו יורק. כל היחידות יוצרו בפולין ע"י PolCom Modular והובלו לניו יורק. שלוש הקומות התחתונות הן מבטון, וכן הגרעין של המעליות. יתר 17 הקומות מבוססות על 210 יחידות מודולריות.

Future Form – Student Residence, London

חברת Future Form בנתה בלונדון בניין מעונות סטודנטים בן 17 קומות מיחידות מודולריות גדולות במיוחד (רוחב של 3.8 מ' ואורך של 16 מ'), אשר כללו שני חדרים ומסדרון. לבניין גרעין מרכזי עגול מבטון וממנו יוצאים שלושה אגפים הבנויים מיחידות מודולריות. היחידות הושלמו לחלוטין במפעל, למעט חיפויי המסדרון שהושלמו באתר לאחר השלמה וחיבור של מערכות השירות. האגף המערבי

כלל 16 קומות של יחידות מודולריות על קומת בסיס מבטון. האגפים האחרים כללו 4 ו- 6 קומות של יחידות מודולריות על בסיס של שתי קומות מבטון. הגרעין וההרכבה של היחידות התקדמו במקביל במשך 15 שבועות. קצב ההרכבה היה כ- 6 יחידות בממוצע ליום. משקל היחידה הכבדה ביותר היה כ- 12 טון. החזיתות הורכבו באתר, וחוברו על גבי מתקני ההרמה (אשר שמשו גם כהגנה הקפית בזמן ההרכבה).

העובי הכולל של תקרה + רצפה היה 38 ס"מ. בין היחידות הותקן סרט גמיש כדי להגדיל את הפרדה האקוסטית כנגד קול הולם ולספוג את סטיות הביצוע.



Neapo - Finland

שיטת הבנייה של נאפו נועדה לבניינים עד 10 קומות. היא מבוססת על יחידות מודולריות עם שלד קל מפאנלים מפלדה. הפאנלים, המכונים Fixcel, עשויים מחתך כוורת מפח פלדה בעובי 0.7 עד 1.2 מ"מ. עובי כולל של מבנה (קונסטרוקציה) הקירות הוא 100 מ"מ, ושל הרצפה 150 מ"מ. את הפאנלים ניתן לייצר ברוחב של עד 5 מ' ובאורך של עד 22 מ'. המגבלה היחידה לגבי המידות היא אפשרות השינוע לאתר. ייצרו והובילו כבר יחידות ברוחב של 5 מ'. הפאנלים הם המערכת הנושאת ואין קונסטרוקציה נוספת. החיפוי הפנימי הוא מלוחות גבס, ומותאם לדרישות עמידות האש (לוח כפול מאפשר יותר מ- 120 דקות). הבידוד התרמי מוקנה ע"י לוחות בידוד קשיחים מבחוץ (בפינלנד בעובי 20 ס"מ), המותקנים במפעל. בפתחים גדולים מותקנת לצורך השינוע הקשחה מאלכסונים זמניים. השיטה שמשה עד כה לבנייה של בניינים נמוכים, וכן לבניין בן 5 קומות בהלסינקי.

Vision – Student Residence, Wolverhampton

חברת Vision בנתה עד כה יותר מ- 15 פרויקטים של מבני מגורים, בתי מלון ובעיקר בנייני מעונות סטודנטים, כולל הבניין הגבוה ביותר שנבנה בשלב זה (בניין אפקס בוומבלי, לונדון, שהוא בן 29 קומות).



הפרויקט המתואר ע"י MODCONS הוא של מעונות הסטודנטים באוניברסיטת וולברהמפטון, אנגליה, הכולל שלושה בניינים. אחד מהם בן 25 קומות באגף אחד ו- 18 קומות באגף השני, והשניים האחרים בני 8 ו- 10 קומות. החלק המתועש הוקם על גבי מסד מבטון או קומה תחתונה מבטון. הפרויקט כלל 820 יחידות תלת ממדיות שהורכבו במהלך של 9 חודשים. קצב ההרכבה היה כ- 6 יחידות בממוצע ליום בחורף וכ- 10 ליום לאחר מכן. משך כל הפרויקט היה 15 חודשים. גימור המעטפת בוצע באתר. בקומות התחתונות הגימור החיצוני הוא בלבני חרסית, ובקומות הגבוהות יותר בקומבינציה של בידוד מחופה בטיח דק, פאנלים קלים מבודדים, וחיפויי מתכת מאווררים. עומסים אנכיים מועברים באמצעות קירות היחידות. כוחות אופקיים באמצעות רצפות הבטון של היחידות אל גרעין מבטון. היחידה מבוססת על רצפת בטון בעובי 150 מ"מ יצוקה במסגרת פלדה, ושלד אנכי מפרופילי פלדה 60X60 במרחקים של 600 מ"מ, למעט בקומות הנמוכות של הבניין הגבוה בו הפרופילים של קירות היחידות גדולים יותר. היחידות הגיעו לרוחב של עד 4 מ' ואורך של עד 8 מ'. כל יחידה כללה בדרך כלל שני חדרים משני צדדים של מסדרון מרכזי. החיבור בין היחידות היה בפינות ובנקודה נוספת במרכז הפאה הארוכה.

ההרכבה של הבניין הגבוה נעזרה בעגורן של 30 טון עם זרוע של 20 מ', אשר לצורך ייצובו בעת ההרכבה של קומות גבוהות חובר לקומות התחתונות.

חלק מהיחידות בולטות כ- 2.5 מ' מעבר לחזית. לצורך זה הותקנה קונסטרוקציית פלדה נפרדת והרצפה בחלקים אלה בוצעה ממבנה קל. דיוק הייצור היה ± 5 mm, ודיוק ההרכבה ± 10 mm.

בוצע מעקב אחרי תהליך הביצוע. כוח האדם באתר כלל 52 עובדים, מתוכם 5 מנהלי אתר (לעומת ההערכה של יותר מ- 200 בפרויקט מסוג זה בבנייה בריטית קונבנציונלית).

מציגים את ההישגים הבאים:

בממוצע הרכבה של 7.5 יחידות ליום

הפחתה של 40% במשך הביצוע הכולל של הפרויקט

הפחתה של 75% בכוח האדם באתר

הפחתה של 90% בפסולת בניין באתר

הפחתה של 60% באספקות לאתר

הפחתה של 70% בהסעות של בני אדם וחומרים.



461-Dean, Brooklyn

בניין המגורים 461 Dean בברוקלין ניו-יורק, שתוכנן ע"י משרד אדריכלים SHoP ונבנה ע"י החברה היזמית FCRC, הוא בן 32 קומות (גובה הבניין 109 מ') וכולל 363 דירות להשכרה בתמהיל של 23 דגמי דירות.

הבניין נבנה מ 930 יחידות תלת ממדיות. היחידות הגיעו לאתר מושלמות מבפנים ומבחוץ, כולל אבזור ומכשירי חשמל. לא בוצעה שום מעטפת נוספת בחוץ.

החברה היזמית תכננה את הבניין מלכתחילה בשיטת היחידות המודולריות D3 יחד עם חברת האדריכלות ShoP וחברת ההנדסה ARUP. החברה המבצעת שנבחרה הייתה Skanska השבדית, אשר לא היה לה ניסיון בבנייה מסוג זה. על אף העדר הניסיון, החברה הקימה מפעל לייצור היחידות בלי לצרף פרטנר בעל בקיאות וניסיון בתחום.

תוך כדי הבנייה התעוררו בעיות של חוסר תיאום מלא בתכנון ובביצוע בין השלד הנושא לדרגת הדיוק של היחידות. נגרם נזק עצום ללוח הזמנים, ותביעות משפטיות בין החברה היזמית למבצעת. הטענות העיקריות היו: ייקור הבנייה ב- 110 מיליון דולר (לעומת 155 מיליון דולר המתוכנן), אי עמידה בלו"ז, ונזקי רטיבות. בגלל התביעה, החברה המבצעת סגרה את המפעל בתום 10 קומות מתוך ה- 32, אליהן הגיעה אחרי 21 חודשים מראשית הבנייה (כאשר כל הבניין היה אמור להסתיים אחרי 18 חודשים). ההאשמות ההדדיות כללו: מצד היזם – האשמת המבצע בעבודה לא מיומנת בגלל הכשרה לא מספיקה של העובדים. מצד החברה המבצעת – האשמת המתכננים בתכנון לקוי של תיאום המערכת הנושאת והיחידות.

כמו כן היו בעיות של חדירת מים והצפות בארבע הקומות הראשונות. בגלל חדירת המים והתפתחות עובש הוסרו לוחות גבס ליד חלונות, להתקנה מאוחרת יותר, וכך פגמו בקצב הבנייה וברעיון של בנייה עם יחידות מוגמרות.

הבעיות של אי התאמה במידות (טולרנסים קטנים מדי) גרמו לבעיות בהשחלת יחידות למקומן, לחיצה ודחיקה עד לגרימת נזק פיסי ליחידות.

העדר התאמה במידות גרם לכך שהקומה הראשונה הוקמה בארבעה חודשים במקום בשבע כמתוכנן!!!

כמו כן היו טענות שבתכנון לא נלקחו בחשבון בצורה נכונה הדפורמציות והשפעתן על הגיאומטריה. בסופו של דבר החברה היזמית רכשה את המפעל והמשיכה בבנייה בכוחות עצמה וסיימה אותו תוך כ- 16 חודשים.

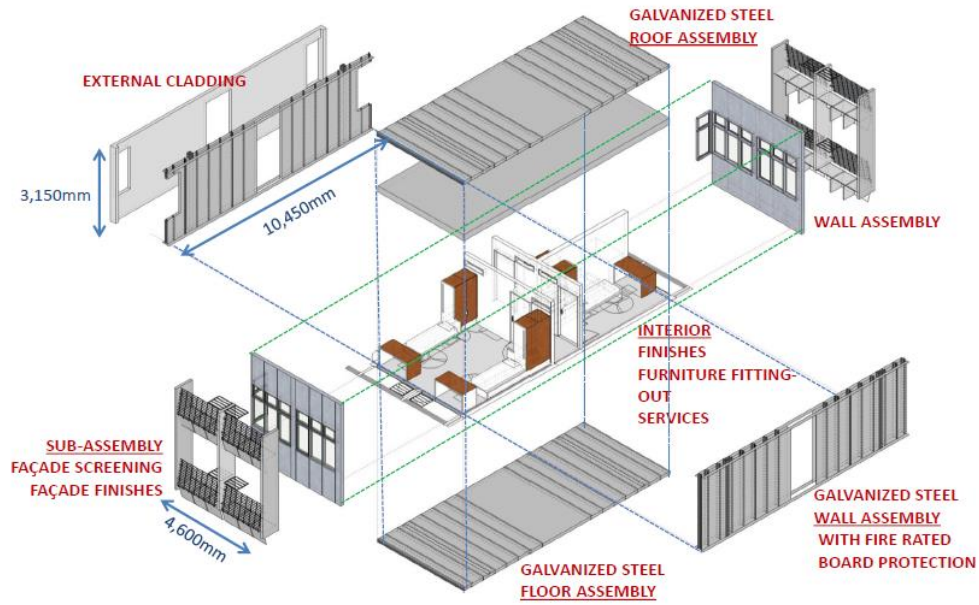


Chain 2018

האוניברסיטה הטכנולוגית של נאניאנג הייתה בין הראשונים להירתם לאתגר שהציבה רשות הבנייה של סינגפור בדרישתה להעביר חלק ניכר של הבנייה טכנולוגיה של בנייה מודולרית עם יחידות מוגמרות במפעל. בשנת 2013 הוחלט להקים שני פרויקטים גדולים של מגורי סטודנטים וסגל בבנייה מסוג זה: NTU1 שכלל 1288 חדרי סטודנטים לבודדים, 294 חדרים לזוגות, 66 דירות סטודנטים, ו-12 דירות סגל. פרט לקומות הפודיום התחתונות וגרעיני הבטון, יתר חלקי הבניין בוצעו מיחידות תלת ממדיות מפלדה. NTU2 שכלל 1233 חדרים ליחידים, 294 חדרים לזוגות ו-12 דירות למשתלמים.

המבנה העקרוני של היחידות נתון בתמונה:

Major Components of a typical module



מראה הפרויקטים, בהם כל החלקים הגבוהים מבוססים על הבנייה המודולרית עם גרעיני בטון:



המבנים של היחידות בוצעו במספר מפעלים. משם שונעו המבנים למפעל אחד בו בוצעו סגירות של הקירות, עבודות הבידוד, איטום וגמר, כולל עטיפה לצורך שינוע סופי לאתר.

לוח הזמנים של הפרויקטים נתון בתמונה:

Project Brief – PPVC Adoption Timeline

- 2011 (since) Promotion by BCA on adoption of game-changing technologies in the construction sector for productivity gains
- 2013 **1 Aug >** NTU's media announcement of NTU's adoption of PPVC in its residential halls
- 2014 **23 Jun >>** NTU1 main contract award
15 Aug Media announcement of similar adoption for Crowne Plaza
8 Sep BCA briefing to government agencies on PPVC
Sep/Oct NTU1 Project detail consultation with authorities
- 2015 **15 May >>** NTU1 start production of 1st steel chassis
2 Jun >>> NTU2 main contract award
2 July BCA's 2nd Exec WS on Game Changing Technologies
17 Aug > NTU1 lifting and installation of 1st complete module
13 Oct BCA's Build Smart Conference – PPVC key note paper
- 2016 **6 Jan ***** DPM Tharman and National Productivity Council site visit
23 Mar >>> NTU2 lifting and installation of 1st complete module
7 Aug NTU1 – Substantial completion
1 Sep NTU1 – TOP (occupation)
31 Dec NTU2 – completed all modules installation
- 2017 **22 Jun** NTU2 – TOP (occupation)



<http://dragages.com.sg/>

חברת Dragages בונה בשוק הפרטי בסינגפור בנייני מגורים, בתי מלון, ובתי אבות. פרויקטים נבחרים, רובם בשיטת תכנון וביצוע, כוללים:

The Clement Canopy – שני בנייני מגורים בני 40 קומות, (46,000 מ"ר), הכוללים 505 דירות.

Woodlands Care Home – בית אבות בן 9 קומות (9000 מ"ר) שנבנה מ-300 יחידות 3D.

Crown Plaza – תוספת למלון קיים, בת 10 קומות (10,000 מ"ר) בשדה התעופה בסינגפור.



Rosenfeld 2019

חזנפלד ביקר באתר הרכבה אחד בטרונדהיים בפינלנד ותישאל את מנהל העבודה בעת ההרכבה. צוות המרכיבים מנה 6 פועלים מיומנים ומנוסים בהרכבות כאלו בנוסף למנהל העבודה. בצמוד אליהם עבד עגורן מתנייע (פלוס מפעילו). הקצב הוכתב על-ידי "החוליה" האיטית יותר: לפעמים – העגורן,

ולפעמים – הצוות. לפי עדותו של מנהל העבודה (הלטבי) בפרויקט זה, ביום עבודה רגיל (ללא הפרעות של רוחות עזות או גשמים) הוא וצוותו הרכיבו 8 עד 11 יחידות מודולריות ביום עבודה. הממוצע שלהם בפועל (עם ימים בעייתיים) היה כ- 7 יחידות ליום עבודה; כלומר, 1 יום-עבודה להרכבת יחידה (7 אנשים הרכיבו 7 יחידות ביום). המוטו של מנהל ההרכבה היה: "כל זמן שהעגורן מסוגל לעבוד – עובדים. אני מעדיף קצת עודף באנשים, אבל – שהעגורן ינוצל במקסימום האפשרי". יחד עם זאת, גם במקרה ספציפי זה הבחין רוזנפלד, למשל, שאילו דאגו להצטייד בסט נוסף של אביזרי הרמה (חגורות וכבלים) היו יכולים לקצר את מחזור ההנפה בכ-30%. שיטת העבודה הייתה שלאחר שצוות ה"מענבים" (2 עובדים) שילח את היחידה, הוא עמד וחיכה לשובו של העגורן אל אזור הטעינה עם אביזרי ההרמה תלויים על אונקלו. רק אז הם יכלו להתחיל לקשור ולענב את היחידה הבאה, כאשר העגורן עומד וממתין להם.

בינתיים – בזירת ההרכבה בבניין, גם-כן היו הרבה "המתנות תהליך": צוות ההרכבה, אשר מנה 4 עובדים, כיוון את היחידה החדשה למקומה, הניחה במדויק, בדק שהכול מפולס ומוצב בצורה נכונה, תיקן את ההצבה אם היה צורך, שיחרר את אביזרי ההרמה, תלה את כולם על אונקל העגורן, ולבסוף – העגורן שב עם האבזרים התלויים בקצהו אל אזור הטעינה.

כעת, מרגע שחרור העגורן, "הגיע תורו" של צוות ההרכבה לעמוד ולהמתין עד אשר תגיע היחידה הבאה. ההמתנה התמשכה כחצי שעה. העגורן הביא בקצה אונקלו את אביזרי ההרמה אל אזור הטעינה; חיכה וחיכה עד אשר הם נקשרו כמו שצריך על-ידי שני המענבים, ואז הניפם בזהירות ובאיטיות אל אזור ההרכבה בבניין.

אילו רק דאג מנהל ההרכבה שיעמוד לרשותו סט נוסף של אביזרי הרמה – יכול היה צוות המענבים להכין את החיבורים והקשירות של היחידה הבאה בזמן שהיחידה הנוכחית באוויר, ואילו העגורן – יכול היה להניח את היחידה החדשה, מבלי להמתין לשחרור אביזרי ההרמה שלה, אלא לקחת בחזרה, על אונקלו, את אביזרי ההרמה של הסבב הקודם, וחוזר חלילה.

בסיכומו של ניתוח האירוע הספציפי הזה, סביר להעריך שבתהליך יעיל אפשר להרכיב כעשר יחידות ליום-עגורן, ואף יותר.

Rothschild 2019

אדריכל דן רוטשילד, מנהל תחום חקיקה ותקינה במשרד הבינוי והשיכון, ואדריכל ניר חן, חבר צוות המחקר, קיימו סיור ב-13.5.2019 בשני מפעלי חברת פורטה פרו (Ventspils + Tukums) בלטביה. נציגי החברה איתם נפגשו במהלך כל הסיור היו: אביב ברוסילובסקי, מנהל פיתוח עסקי; שחר איצקוביץ', מנהל תחום ישראל; מהנדס החברה בשם קריסטופס; ומנהלת המפעל בונטספילס בשם אגנס.

מייד לאחר מכן, ב- 15.5.2019, קיימו אדר' דן רוטשילד ופרופ' יחיאל רוזנפלד, חבר צוות המחקר, סיור במפעל של חברת DMDMODULAR, בעיר SKAWINA שליד קרקוב בפולין. נציגי החברה איתם נפגשו במהלך סיור זה היו המנכל"ית אוולינה ווז'ניאק, והאדריכלית יוהנה ראביי.

גודל שלושת המפעלים דומה מאוד, והוא כ-12,000 מ"ר בנוי למפעל. במפעלים בלטביה נמסר כי ישנם כ-120 פועל למפעל בעוד שבמפעל בפולין נמסר כי ישנם כ-60 פועל במפעל. לא ברור בוודאות מדוע יש הבדל כה גדול, אך ניתן להניח שבנפח עבודה גדול וכאשר המפעל פועל במשמרות, 24 שעות ביממה או אפילו 16 שעות ביממה, כמות העובדים המועסקים חייבת להיות גדולה יותר ממפעל שעובד כ-8 שעות ביממה.

במפעל בוונטספילס קיים "פס ייצור" ייחודי בשיטת סרט נע, הכולל מסילה ברצפה, עליה נעות היחידות המודולריות מתחנה לתחנה. נאמר ע"י נציגי המפעל שרובוטים בהחלט על הפרק, אך הכדאיות הכלכלית שלהם תגיע כנראה רק כאשר יהיו הזמנות של כ-1000 יחידות ויותר לפרויקט. כיום ההזמנות הן סביב 200-300 יחידות לפרויקט.

בתחילת כל פרויקט רצפת המפעל מתנקה כמעט לחלוטין ובונים את פס הייצור בהתאם לצרכים המיוחדים של הפרויקט. קיימות במפעל עמדות של נגרייה, מסגרייה, ועבודות חשמל, אך הן אינן קבועות ומותאמות לתחנות שלאורך קו הייצור של כל פרויקט.

ראוי לציון ניקיון רצפת המפעלים. מאחר וזהו מקום עבודה שבאים אליו כל יום ולא אתר מזדמן, יש צוות שאחראי על הניקיון כולל מכונה לשטיפת רצפה. כל העובדים מפנים אחריהם את הפסולת, אם קיימת, ולא רואים במפעל פסולת אקראית ושאריות כגון קרטונים, משטחים, ברזלים, חומרי בנייה ובידוד, כמו שרגילים לראות באתרי בנייה.

הפרויקטים שהיו בביצוע במהלך הסיורים כללו:

במפעל של חברת פורטה פרו בטוקומס – ייצור של מחלקת חדרי MRI לבית חולים. מדובר במקרה הזה ביחידות שלא מאופיינות בחזרתיות גבוהה (כגון חדרים של בית מלון), כי אם במורכבות גבוהה של מערכות וצנרות. היחידות סודרו כ"לגו", באופן המדגם את הצורה בה יונחו באתר המיועד.

בעת הסיור שלב הביצוע כלל גמר פנים על ידי לוחות גבס והתקנת מצע קשיח לריצוף בהדבקה (לוחות יבשים שחוברו לשלד). מערכות התקרה היו חשופות עדיין. בכל מקום בו קיים פתח גדול, בין אם בקיר חוץ או בחיבור של שתי יחידות, היו אלכסוני פלדה זמניים על מנת לשמור על צורתו של המודול ומניעת עיוותים בהובלה ובהרכבה.

בצד החוץ היחידות היו מחופות ביריעות פוליאיתילן מחוזקות בסיבים לצורך איטום מפני חדירת מים. מחוץ ליריעות הוצמדו מרישי פלדה שעתידים לקבל את החיפוי החיצוני, שבמקרה הזה יורכב באתר הבנייה. בחיבורים בין יחידה ליחידה הושארו מראש יתרות של יריעות על מנת שיהיה קל להשלים את רצף האיטום באתר הבנייה לאחר הרכבת היחידות.

במפעל של חברת פורטה פרו בוונטספילס – פס ייצור של שכונת מגורים בבנייה רוויה. התחנות לאורך פס הייצור עקבו אחרי מלאכת ההרכבה של בניין על כל שלביה, כאשר השלבים "מונחים" על הפס אחד ליד השני, ולכל תחנה יש צוות עובדים ייעודי משלה. בתחנה הראשונה מורכבות מסגרות הפלדה, ולאחר מכן, בתהליך רצוף מתחנה לתחנה: המילואות בקירות, הכנסת המערכות, חיפוי המערכות, ריצוף חיפוי וצביעה, בקרת איכות ותיקונים, ריהוט ואבזור, עיטוף היחידה והכנתה למשלוח.

במפעל של חברת DMD בסקווינה – שכונת מגורים בבנייה צמודת קרקע עם גגות משופעים, אך ללא יחידות שנערמות אחת על השנייה. כאן לא היה פס ייצור, והיחידות נפרשו על רצפת המפעל כאשר צוותי ההרכבה השונים "טיילו" בכל שטח המפעל.

המשתתפים בסיור מודים לנציגי המפעלים:

- ליאון זילבר, בעלים
 - אביב ברוסילובסקי, מנהל פיתוח עסקי, פורטה פרו
 - שחר איצקוביץ', מנהל תחום ישראל, פורטה פרו
 - Ewelina Woźniak-Szpakiewicz, CEO, DMD-Modular
 - Joanna Rabiej, Architect, DMD-Modular
- כל התמונות להלן מוצגות באישור המפעלים.

תמונות של יחידות שצולמו במפעל DMD:





תמונות של יחידות ודירות שצולמו על ידי חברת פורטה פרו:







מראי מקום 12.1-א

461-Dean, Brooklyn.

<http://www.skyscrapercenter.com/building/461-dean/14897>

<https://www.dezeen.com/2016/11/18/worlds-tallest-modular-prefabricated-apartment-tower-shop-architects-brooklyn-new-york/>

<https://citylimits.org/2015/08/31/documents-reveal-woes-at-pioneering-atlantic-yards-building/>

<https://www.nytimes.com/2016/10/06/nyregion/developer-that-cracked-the-code-on-modular-building-exits-the-business.html>

Boafo, F.E., Kim, J.H., Kim, J.T., 2016, "Performance of Modular Prefabricated Architecture: Case Study-Based Review and Future Pathways". Sustainability 2016, 8, 558.

Cartz, J.P., Crosby, M., 2007, "Building high-rise modular homes". The Structural Engineer – 9 January 2007, p20-21.

Chain, P., 2018, "Pre-fabricated Pre-finished Volumetric Construction (PPVC) in Singapore: NTU Case Studies (Residential Halls)". Office of Development & Facilities Management, Nanayang Technological University, Singapore.

Gardiner, P., 2015, "The construction of a high-rise development using volumetric modular methodology". CTBUH Research Paper. Council on Tall Buildings and Urban Habitat.

Generalova, E.M., Generalov, V.P., Kuznetsova, A.A., 2016, "Modular buildings in modern construction". Procedia Engineering 153 (2016) p167–172.

HTA, 2015, "Mainstreaming offsite manufacturing for the UK housing sector". HTA Design LLP, London, UK.

<http://dragages.com.sg/>

MODCONS Case Studies. FP7-SME-2012-1 GRANT AGREEMENT N° 315271
MODCONS DEVELOPMENT OF MODULAR CONSTRUCTION SYSTEMS FOR
HIGH-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS.

Oh, S., Cho, B., Kim D.J., 2017, "Development of an Exportable Modular Building System by Integrating Quality Function Deployment and TRIZ Method". Journal of Asian Architecture and Building Engineering, September 2017, p535-542.

Rosenfeld, Y., 2019, Personal experience of the author, dedicated report within this research project.

Rothschild, D., 2019, Personal experience of the author during a dedicated professional trip sponsored by the Israeli Ministry of Construction and Housing within the framework of this research project.

א-13. בנייה במכולות

המכון האמריקאי לבנייה מודולרית [Modular Building Institute (MBI)] חיבר סקירה רבת משתתפים אודות הסדרת התקינה העוסקת בשימוש הבטוח במכולות ימיות כמבנים או כחלקי מבנים (Shang and Willmot 2017). בפתיח לסקירה זו מציינים המחברים כי השאיפה הציבורית לבנייה בת קיימא דחפה לשימוש במכולות לצורך בנייה, עוד בטרם הוסדר הדבר בתקינה. על פי המחברים ה-IRC International Residential Code וה-IBC International Building Code למעשה הגיבו תגובה מאוחרת למגמה הגוברת של השימוש במכולות ימיות לצרכי בנייה ונמצאים בפיגור בהיבט של הסדרת הנושא בתקינה. כתוצאה מכך נוצר מצב של תקינה העשויה טלאי על טלאי ועלולה ליצור כפילויות או הנחיות סותרות. בנוסף לכך, בחודש פברואר 2016, פרסם ה-International Code Council (ICC) קווים מנחים משלו המפורטים במסמך ICC-ES AC462. לפיכך התעשייה, באמצעות ה-MBI וה-NPSA National Portable Storage Association, החליטה ליזום מהלך לעזרה בייצור תקנות או תקנים על מנת להשיג את המטרות להלן:

- להקטין את ההשפעה של מוצרים השייכים ליצרן בודד
- ליצור מסלול ברור לעמידה בתקינה
- ליצור הנחיות לייצור עתידי של מכולות מותאמות לבנייה

בסיכום הפתיח ציינו המחברים כי המכולות הימיות מיוצרות תוך עמידה בדרישות תכן קפדניות, ובהמשך עומדות במבחן הכולל מסעות סביב העולם, לפני שיהפכו לרכיבי מבנה. מטרת המסמך ליצור הבחנה בין היישומים השונים שלהן בדרך בטוחה אך יעילה. לטענת המחברים המסמך שהוצע על ידי ה-ICC (ICC-ES 2016) לוקה בכך שהוא שואף לייצר פתרון אחד שיתאים לכל היישומים, החל ממשרדים חד קומתיים [המכונים על ידם (Ground Level Offices (GLO)] עד למבנים קבועים רבי מכולות, דבר העלול להוביל לפסילה של השימוש ברוב המכולות הקיימות בכל סוג של בנייה. כתוצאה מכך האפקט של "בנייה ירוקה" יפחת באופן דרמטי, ויוסיף עלויות הן לקבלנים ראשיים והן ליצרני המודולר (יש להדגיש כאן כי המסמך חובר על ידי התעשייה ולכן, באופן טבעי, הוא נוטה להיות מתירני בגישתו). יחד עם זאת הן דרך הקטלוג של סוגי הבנייה והן הגישה לסוגיות השונות יכולות להפיק תועלת חשובה בלמידה ההתייחסות לתקינה בנושא השימוש במכולות ימיות וכן בנושאים כלליים הנוגעים לתעשיית המודולר.

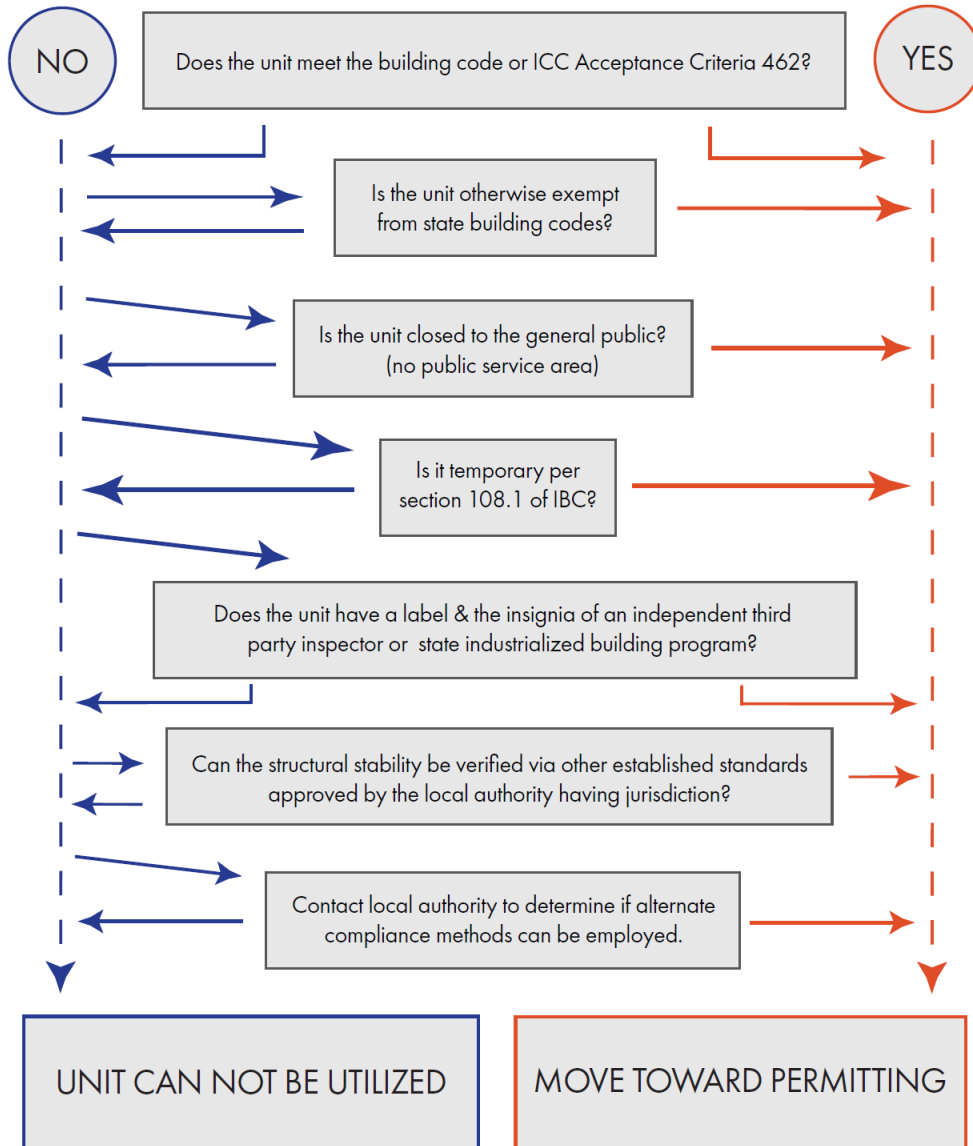
המחברים מציעים לחלק את סוגי המבנים המוקמים ממכולות ימיות לפי השימוש (מבנה זמני או קבוע) ולפי מספר היחידות המיושמות במבנה (יחידה אחת או יחידות רבות). חלוקה זו יוצרת ארבע אפשרויות שלגבי כל אחת מהן הוגדרו סוגי המבנים, החל ממשרדי אתרי בנייה וכלה במבנים מרובי יחידות דוור. הציור המצוטט מתאר את מערכת הסיווג.

	TEMPORARY	PERMANENT
SINGLE UNIT	I GROUND LEVEL OFFICE CONSTRUCTION OFFICE STORAGE UNITS	III INDUSTRIAL WORKSPACE EQUIPMENT ENCLOSURES SECURITY ACCESS POINTS
MULTI-UNIT	II POP-UP RETAIL TRADE SHOW STRUCTURES SPECIAL EVENTS	IV INDUSTRIAL HOUSING HOTELS MULTI-FAMILY

סיווג מבנים העשויים ממכולות ימיות (Shang et al. 2017)

ההבחנה בין מבנה קבוע למבנה זמני מוצעת על פי ה-IBC סעיף 108.1, המגדיר מבנה זמני ככזה שנבנה לתקופה שלא תעלה על 180 יום, עם אפשרות לתקופת הארכה על פי ייעודו של המבנה. הדרישה ממבנה זמני היא הבטחת הבטיחות, הבריאות, והרווחה לציבור, ולא עמידה בכל דרישות התקינה למבנים קבועים. בנוגע למספר המכולות המרכיבות מבנה מובאת כאן הדוגמה של פטור מרישוי למבנים בשטח קטן מ-320 sf (כ-30 מ"ר). המחברים מציינים כי החשש העיקרי בקרב התעשייה הוא מפני יישום רטרואקטיבי של תקנות ותקנים, היות שהחברות כבר השקיעו בין שניים לשלושה מיליארד דולרים במבנים ניידים להשכרה העשויים ממכולות. לפיכך מודגש כאן כי, על פי התקינה למבנים קיימים [International Existing Building Code (IEBC)], יש להטיל עמידה בתקנים ותקנות רק לגבי התקופה שלאחר כניסתם לתוקף.

כפועל יוצא של ההגדרות המתוארות בציר 2 מציעים המחברים ארבע הגדרות של סוגי מבנים כדלקמן: (1) סגמנט I – יחידה אחת של מכולת 8 על 20 רגל המשמשת כמשרדי אתר בנייה לתקופה של לא יותר מ-360 יום; (2) סגמנט II: מבנה רב-מכולות זמני אשר על אף היותו זמני הוא פתוח לציבור ואינו יכול ליהנות מפטורים המוענקים למבנה זמני; (3) סגמנט III – מבנה קבוע המורכב מיחידה אחת, אשר עקב כך שהמעטפת שלו בנויה ממכולה יש בעיה לענות על דרישות של מספר תקנים כגון שיפוע 2% בגג. אך יתר התקנים מחייבים למבנה זה; ו-(4) סגמנט IV – מבנה רב-מכולות קבוע. בהמשך מוצע אלגוריתם לאישור או פסילה של מכולה, גם אם אינה עומדת בדרישות של ICC-ES AC462, כמפורט בציר המצוטט:



תהליך מוצע של אישור או פסילה של מכולות ימיות (Shang and Wilmot 2017)

כפי שהוסבר לעיל המכולות הימיות מיוצרות תוך עמידה בדרישות תכן קפדניות, וכן בהמשך מהלך חייהן עומדות הן במבחן הכולל מסעות סביב העולם, לפני שיהפכו לרכיבי מבנה. לפיכך ניתן להתייחס לתו האישור המחובר למכולה כאל אישור עמידות המבנית. המחברים מפרטים חישוב על עמידות המכולה היחידה בעומסים סיסמיים, אך אינם מתייחסים לדרך החישוב של מבנים רבי מכולות. במקרה זה, וכן במקרים בהם נחתכים פתחים בדופן המכולה, יש לפנות לייעוץ הנדסי.

המחברים מתייחסים אף לטענות בדבר הימצאות חומרי הדברה רעילים במכולות וטוענים כי שלושה חומרים (Basileum, Tailileum 400, ו-Radaleum) אינם מהווים סיכון, אך מציינים כי המידע הוא ראשוני וחלקי ומדגישים את הצורך בניתוח מעמיק של הסוגיה לפני הסקת מסקנות כלשהן.

עיקרי ההמלצות לתקינה, על פי הצעת ה-MBI, הם כדלקמן:

- לגבי מבנים זמניים מיחידה אחת, המוגדרים כסגמנט I
 - כל המבנים הקיימים במלאי של מבנים כנ"ל יוכרו כ"מבנים קיימים" על פי IEBC
 - המבנה יוכר כזמני אם לא יחליף בעלות, או אם יוקם כמשרד במקומות שאינם נגישים לציבור
 - כל מבנה בשטח הקטן מ-720 sf (כ- 67 מ"ר) יהיה פטור מרישוי כל עוד אינו חלק ממבנה קבוע ואינו פתוח לציבור.
 - יש לחבר תקן למבני משרדים חד קומתיים זמניים (GLOs)
 - כל דרישה ממבנים אלו לעמוד בדרישות של ICC-ES AC462 היא מסורבלת וקשה עד בלתי אפשרית למימוש
- לגבי מבנים זמניים הפתוחים לציבור המוגדרים כסגמנט II – אין אפשרות לפטור אותם מרישוי אלא להתייחס אליהם בכפיפות לדרישות המפורטות להלן למבנים מסגמנט III או IV
- לגבי מבנים קבועים מיחידה אחת המוגדרים כסגמנט III
 - כל מבנה בשטח הקטן מ-720 sf (כ- 67 מ"ר) יהיה פטור מרישוי כל עוד אינו חלק ממבנה קבוע ואינו פתוח לציבור.
 - יש לפתח סטנדרטים לגבי מקרים הדורשים פנייה לייעוץ הנדסי, מומלץ לעשות שימוש בציור 3 לעיל כנקודת התחלה. יש ליצור תקן לגבי כמות הפתחים המותרת בקירות המכולה וכיצד יש לטפל בתוספת חיזוקים לאחר פתיחתם. כדוגמה לנוסח: יש לערב מהנדס מבנים לאישור תכן אם למעלה מ-25% מאורך קירות המכולה נחתך.
 - יש להגדיר אילו דרישות תקן תחייבנה מבנים מסוג זה ואילו לא על פי המפורט
 - תקני בטיחות כגון דרישות מבניות, בטיחות בחשמל ובטיחות באש יהיו מחייבים
 - דוגמה לדרישות שאין לחייב עקב אילוצים של ממדי המכולה – גודל חדר, גובה תקרה, שיפוע הגג, נגישות.
- בהתייחסותו למבנים קבועים רבי מכולות, המשויכים לסגמנט IV, מפנה המסמך את הפיקוח וההחלטה לרשות המקומית (המכונה כאן Authority Having Jurisdiction AHJ). ההמלצות יופרדו לשני סוגים כדלקמן
 - כאשר יש שימוש במכולה ריקה כחלק מבני ולאחר מכן עבודות הגמר והמערכות נעשות בשטח יש לפקח על העבודה כפי שנעשה בבנייה קונבנציונלית
 - כאשר המבנה מיוצר במפעל ומכיל אלמנטים חבויים שאינם ניתנים לפיקוח בשטח ללא פתיחת גישה אליהם יש לחייבם לעבור בקרת איכות במפעל ולהיות מסומנים בתווית על ידי רשות מוסמכת לעריכת הבקרה.

Jones (2017) סוקר את היישום של מכולות ימיות במבנים קבועים, ופותח בתיאורם של מספר פרויקטים שעשו שימוש במכולות ימיות "מוסבות" (repurposed shipping containers) לצורך בניית מבני קבע, בעיקר בנייה נמוכה למגורים בני השגה.

מתוארים בין היתר מבנים שנבנו בדטרויט על ידי חברת Three Squared Inc., המתמחה בבנייה ממכולות ימיות. מתואר למשל פרויקט Cargominium בקולומבוס אוהיו, מבנה של 25 יחידות דיור "בנות השגה" בשטח כולל של 17,000 sf (כ-1,600 מ"ר, שטח ממוצע לדירה 64 מ"ר), שנבנה כשלב ממכולות פלדה וגמר ומערכות שבוצעו בשטח, כמתואר בציור המצוטט:



פרויקט Cargominium בקולומבוס אוהיו (Jones 2017)

שיטת ביצוע זו יכולה להיחשב בנייה ירוקה עקב השימוש במכולות שעבר זמן. יתירה מזו, עקב המאזן המסחרי השלילי של ארה"ב (יבוא עולה על היצוא) נוצר בארה"ב עודף של מכולות שיצאו משימוש אף לפני שעברו את תקופת השימוש שלהן, שהיא בערך 10 עד 15 שנה.

החומר שממנו עשויות המכולות הוא בדרך כלל פלדת קורטן (סוג של פלדה עמידה בהשפעות מזג האוויר) שיתרונה הוא בכך שלאחר החלדה ראשונית ההרכב שלה מתקבע ואין צורך בצביעה חוזרת לשם אחזקה. אך מכיוון שכך אין זה כלכלי להתיך אותה לשם ייצור אלמנטי בניין כקורות ועמודים, ולפיכך נפתח הכיוון של שימוש חוזר במכולות במצבן המקורי.

ההובלה הנוחה של היחידות מאפשרת אף פירוק מבנים והובלתם לשימוש חוזר.

מצד החסרונות ניתן למנות את הצבע הרעיל להגנה מפני קורוזיה וכן את רצפת העץ המקורית של המכולה. התקלפות מאוחרת של הצבע הרעיל או הסרתו תיצור כמויות של אשפה. כמו כן ייצור הרצפה

המקורית נעשה במקרים רבים תוך שימוש בעץ טרופי שלא נכרת בצורה ידידותית לסביבה (was not responsibly harvested in a sustainable way). יתירה מזו – רצפות העץ עוברות טיפול נגד מזיקים בחומרים המכילים ארסן והחלפתן עלולה אף היא ליצור כמויות של פסולת רעילה.

המחבר מציין לסיכום כי המכולות הימיות הוכיחו את עצמן כחומר בניין יעיל בכל סוגי הפרויקטים, החל מבנייה מהירה לאחר אסונות טבע וכלה במבנים רבי דירות. על אף החסרונות שנימנו למעלה השימוש מוסיף אלמנטים של בנייה ירוקה כגון הפחתת כמות האשפה וקיצור משך הבנייה.

א-13.1 מראי מקום

ICC-ES, 2016, "Acceptance criteria for structural building materials from shipping containers". Index No. AC462, International Code Council Evaluation Service (ICC-ES).

Jones, K., 2017, "Modular construction: shipping container architecture". ConstructConnect.com, <https://www.constructconnect.com/blog/construction-technology/modular-construction-shipping-container-architecture/>, (5/1/2018).

Shang, S., Wilmot, M., 2017, "Safe use and compliance of modifies ISO shipping containers for use as buildings and building components", Modular Building Institute, Charlottesville, US.

לשנות בגוף המסמך ל-(Shang and Wilmot 2017) במקום (Shang et al. 2017)

א-14. מדריכים וספרים

Gorgolewski et al 2003

מדריך כללי לגבי היבטים שונים של תכנון בבנייה מודולרית עם יחידות תלת ממדיות המבוצעות ממסגרות פלדה קלות. המדריך הוא כללי ביותר ואינו מיועד ליצרנים, כי אם אך ורק למתכננים המעוניינים להשתמש בבנייה מסוג זה בפרויקטים שלהם, ומציין במפורש שהתכן הכללי והפרטני של שיטת הבנייה צריך להתבצע על ידי היצרן, כולל פרטי המבנה של היחידות ופרטי החיבור בין לבין עצמן, ו/או בין לבין היסודות והמבנה הראשי.

מדגיש את היתרונות של שימוש בבנייה הנ"ל למגורים: מהירות הביצוע באתר וקיצור כולל של משך הפרויקט, הפחתת ההפרעה לסביבה במהלך הביצוע באתר, איכות גבוהה של היחידות הנובעת מבקרת איכות גבוהה במיוחד במפעל, הפחתת עלות הנובעת מסטנדרטיזציה של יחידות וחזרתיות גבוהה, ייעול הביצוע הנובע מהתקנה במפעל של מערכות שירות וציוד, אפשרות לפירוק והעברה.

מציין שיישום שיטות מסוג זה מתאים ביותר בתנאים הבאים: פרויקטים שחוזרים בתדירות גבוהה, בניינים רגולריים עם חזרתיות ברורה, בנייה באזור עירוני צפוף, בנייה באזור שיש חשיבות גבוהה להפחתת ההשפעה השלילית על הסביבה מבחינת רעש וכד' בזמן הביצוע, הרחבות והגבוהות לבניינים קיימים, פרויקטים בהם יש צורך ברמה כלשהי של פירוק והעתקה.

מסגרת היחידה מבוצעת בדרך כלל מפרופילי פלדה מעוצבים בקר, כולל לפעמים עמודי פינה וחיזוקים בנקודות ההרמה מפרופילי מעורגלים בחם (לרוב מסוג RHS).

מבחין בשלושה סוגים מבחינת הסכימה הסטטית:

יחידות הנישאות על עמודי פינה – היחידה נשענת על הפינות בלבד. הקירות אינם נושאים וניתן לוותר עליהם לצורך יצירת חללים רציפים גדולים. התקרות והרצפות נשענות על הקורות הארוכות. בהובלה נדרשת לעיתים הקשחה זמנית של הקירות.

קירות נושאים – מסגרות הפלדה של הקירות מהווים קיר נושא. הקירות מוקשחים (בדרך כלל ע"י אלכסונים).

יחידות לא נושאות – היחידה אינה מעבירה כוחות מיחידות אחרות ונישאת על גבי קונסטרוקציית המבנה הראשית (בדרך כלל מונחת על גבי תקרות המבנה).

המידות האופייניות הן רוחב של 3.5 מ' ואורך של 8 עד 12 מ'. מציין שאפשר להוביל עד 16 מ'.

שלב השינוע וההרכבה מחייבים בדרך כלל קונסטרוקציה מסיבית יותר משלב השירות.

מדגיש את הצורך לקחת בחשבון את הטכנולוגיה כבר משלב התכנון הראשוני, עבור דרך כל שלבי התכנון והתכן. תכנון מודע טכנולוגיה חיוני במקרה זה יותר מאשר בבנייה רגילה, והוא הבסיס להבטחת איכות מעולה, תאימות בין היחידות ליתר החלקים ורכיבי גמר אם קיימים (מערכות שירות, מעטפת,

גג, איטומים, וכד') ותהליך ביצוע מתואם. יתר על כן, התכן חייב להיות מוגמר לפני תחילת הביצוע של היחידות במפעל. נקודה נוספת שמודגשת היא הצורך במעורבות היזם, היצרן והקבלן הראשי בקבלת החלטות לגבי רמת היישום של הטכנולוגיה הספציפית כבר מראשית הפרויקט. באופן מיוחד יש חשיבות עליונה לתיאום בין אדריכל היזם לבין האדריכל והמתכננים של היצרן. כתלות בצורת ההתקשרות לתיאום זה יש מתכונות שונות. למשל: בפרויקט תכנון-ביצוע (Turn Key) בו ידוע מראש מי היצרן שייצר את היחידות ויבצע את הפרויקט האדריכל של היזם רק מתווה את התכנון הכללי והתכן המפורט מבוצע ע"י האדריכל של היצרן ומאושר ע"י אדריכל היזם. כאשר היצרן אינו מבצע את הבנייה עצמה, יחסי הגומלין מורכבים יותר ולמתכנני היזם מעורבות רבה יותר בתכנון ובתכן המפורט. יש חשיבות רבה להגדרת מערכת יחסי הגומלין ותחומי האחריות של כל גורם. הדו"ח כולל הדגמה של תחומי האחריות בהתאם לכללי ההתקשרות של RIBA (טבלאות 2.1 ו- 2.2 בדו"ח).

פרק 3.1 כולל עקרונות לתכן המבנה ועמידות בעומסים שונים, ומדגים פרטים לתכן החיבורים הן בין רכיבי המבנה של היחידה והן בין היחידות.

פרק 3.2 מתייחס לעמידות בדרישות לבטיחות אש. מתייחס בעיקרון לדרישות בבריטניה ולחומרים ולחתיכים האופייניים המאפשרים עמידות בדרישות. מתייחס למחסומי אש במרווחים שבין היחידות לבין המעטפת החיצונית, במפלסי התקרות וסביב קירות הפרדה בין דירות, וכשמרחק זה קטן מ- 20 מ', במרחקים אופקיים של 20 מ' לפחות. יחד עם זאת, אינו מתייחס להשפעה של פתחים בין היחידות ולסיכון להתפשטות אש דרכם אל המרווחים שבין היחידות ומכאן ליחידות אחרות, ובעיקר אל אלה שמעל לפתח.

הדגש בפרק 3.3, העוסק בתכונות האקוסטיות, הוא על היתרון האקוסטי המוקנה ע"י המבנה של רכיבים כפולים בקירות ובתקרות. כדי להבטיח את הפרדה האקוסטית המלאה יש להתקין פד אקוסטי בין רכיבי הפלדה המחוברים את היחידות בפניות, ולאטום היטב סביב צנרת ורכיבי מערכות העוברים בין היחידות.

הדגש בפרק 3.4, העוסק בתכונות התרמיות, הוא על שני נושאים: א. מיקום הבידוד התרמי מחוץ למערכת הנושאת על מנת למנוע גשרים תרמיים מרובים הנובעים מרכיבי הפלדה. במקרה שהמעטפת מורכבת באתר והיצרן נמנע מהרכבת בידוד חיצוני על היחידה מחמת נזקי שינוע, יש להתקין שכבת בידוד פנימית נוספת עם זקיפים אופקיים בין לוח הגבס הפנימי ללוח המותקן על הזקיפים האנכיים. ב. מחסום אדים ואיטום לאוויר של היחידה. מחסום האדים ומחסום האוויר חייבים להיות רציפים וממוקמים בצד הפנימי (ניתן לאחד אותם בין אם כשמשמשים ביריעת פוליאטילן או בלוחות גבס עם מחסום אינטגרלי בגבם). כאשר עוטפים את היחידות בעטיפת פוליאטילן בצד החיצוני להגנה בעת ההובלה, יש להסירה לאחר ההתקנה באתר על מנת להבטיח מניעה של כליאת אדים בתוך הקירות. יריעות איטום חיצוניות חייבות לאפשר סילוק אדים מתוך הקירות.

פרק 4 כולל הנחיות כלליות לאינטראקציה בין היחידות לבין חלקים המבוצעים באתר, וכן הדגמה של פרטים אופייניים (חיבור ליסודות, חיבורי מעטפת מסוגים שונים, פתחי חלונות ודלתות, גגות מסוגים שונים, ומערכות).

פרק 5 מתייחס לתהליך הביצוע, פרק 7 להיבטים כלכליים, ופרק 8 להיבטים אדריכליים.

פרק 9 כולל רשימה של יצרנים וחברות בנייה בעלי ניסיון בתחום.

Monash University 2017

צמד חוקרים מאוניברסיטת מונאש במלבורן אוסטרליה (Prof. James Murray-Parkes and Dr Yu Bai) ייסד בבראשית שנת 2013 וועדה להכנת קוד לבנייה מודולרית Modular Construction Codes Board (MCCB) במטרה להכין הנחיות תכנון לבנייה מודולרית באמצעות יחידות תלת ממדיות, אשר יכסו את התחומים של תכנון להבטחת התפקוד של הבניינים, תכנון להבטחת הייצור וההקמה, ותכנון להבטחת התאמה לתקנות. הסיבה העיקרית להקמת הוועדה היה מחסור בספרות ובחומר טכני עבור טכנולוגיות בנייה חדשניות מסוג זה. לאחר שאוניברסיטת מונאש נרתמה לנושא, הוועדה הורחבה וכללה תחילה שלושה חברי סגל נוספים ולאחר מכן הצטרפו אליה תשעה אנשי מקצוע נוספים. בהכנת החומר שיתפו החוקרים אנשי מקצוע נוספים מכל הסקטורים המקצועיים הרלוונטיים. טיטת הנחיות שהופקה בתום שלוש שנים עובדה סופית על ידי וועדה מצומצמת ופורסמה בסופו של דבר תוך חצי שנה נוספת.

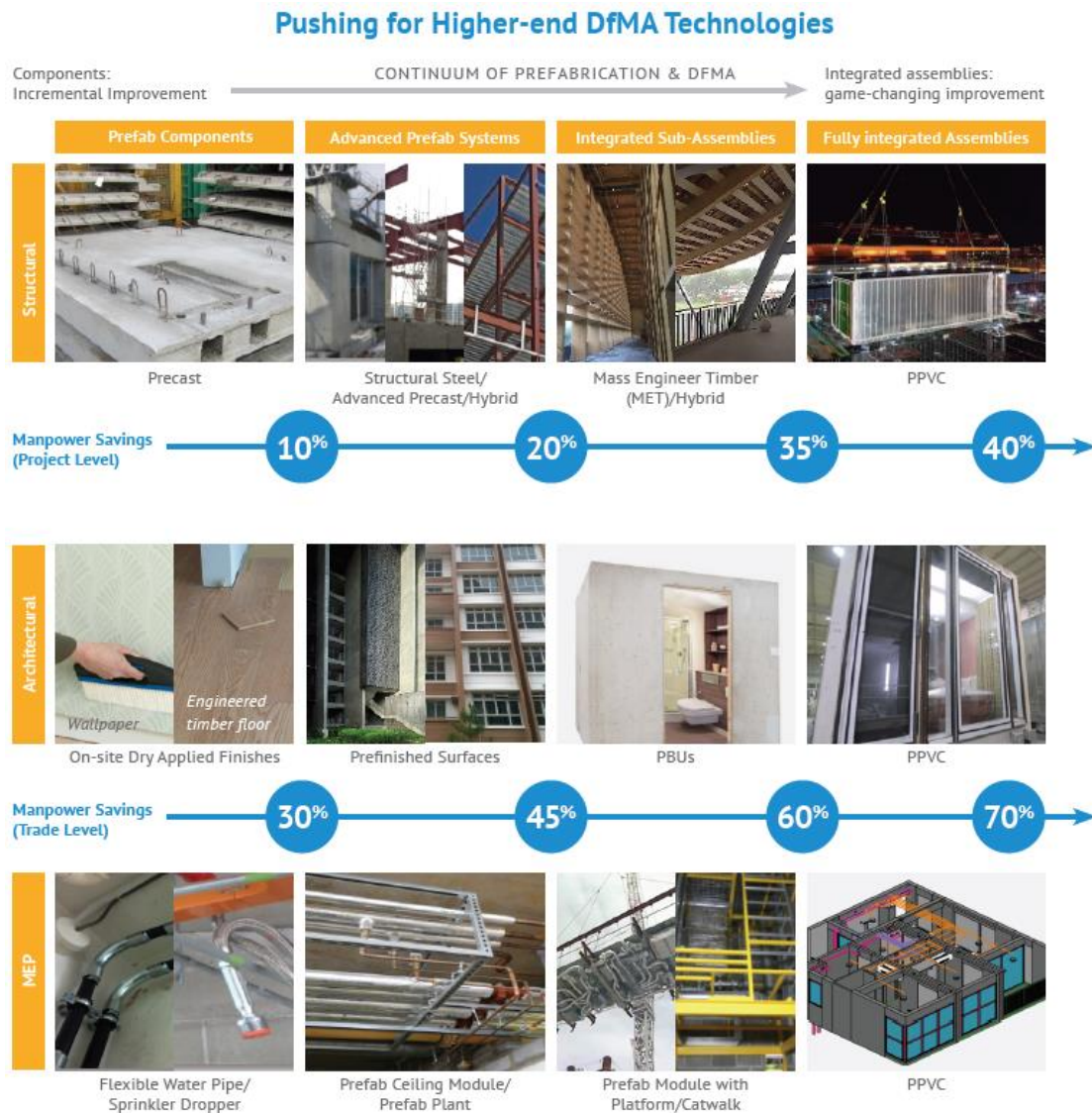
המסמך הסופי כולל את דרישות התפקוד המפורטות החלות על בניינים בבנייה מודולרית בכל תחומי התפקוד הרלוונטיים (תכן המבנה, תכן מערכות השרות, תכן אנרגיה ותפקוד תרמי, תכן המעטפת, תכן לתיאום אדריכלי, ותכן לקיים), את הדרישות החלות על תהליך הייצור במפעל (טולרנסים, חומרים, הגנה בפני קורוזיה, התעדה), את הדרישות החלות בתהליך השינוע, את דרישות הבטיחות, וכן הבהרות לגבי ההתאמה לתקנות האוסטרליות. בנוסף כולל המסמך דרישות לגבי מסמכי תיעוד ותהליכי הבדיקה המומלצים לצורך הבטחת האיכות של המוצר הסופי.

Building and Construction Authority

במסגרת פעילותה הפראקטיבית של רשות הבנייה של סינגפור לתיעוש הבנייה והחדרה של שיטות בנייה מודולריות עם יחידות תלת ממדיות, המכונות שם: PPVC (Prefabricated Prefinished Volumetric Construction), הכינה הרשות מדריך תכנון וביצוע שנועד לכל אנשי המקצוע הרלוונטיים.

המדריך מבהיר שמדיניות הרשות היא לעודד את ענף הבנייה לעבור לתיעוש מרבי, וזאת ע"י אימוץ התפיסה של DfMA (Design for Manufacturing and Assembly), כלומר "תכנון לצורך ייצור והרכבה".

הרשות רואה בבנייה באמצעות PPVC אפשרות לפריצת הדרך בענף הבנייה לכיוון רמת התיעוש הרצויה. הדיאגרמה המצוטטת להלן מבהירה את ההישגים שהרשות מאמינה שניתן להשיג מיישום כזה.



הרשות מדגישה את הצורך בשיתוף היצרן מראשית התכנון, ומעודדת מעבר לשיטות התקשרות של תכנון וביצוע.

המדריך מטפל תחילה בקצרה בנושאים הבאים:

מדגים תכנון אדריכלי מודע טכנולוגיה עבור דירות ובתי אבות סיעודיים, מציין נתונים כלליים של סוגי העורנים הרלוונטיים, ומשווה בין בנייה עם יחידות מודולריות מבטון ומפלדה. לאחר מכן מוקדש פרק שלם (פרק 3) ומפורט יותר למספר נושאים טכנוניים:

3.1 – תכן אדריכלי, שמטפל גם בנושאים של סבולות להבטחת הרכבה מתואמת אופקית ואנכית, ואיטום למניעת חדירת מים בתפרים שבין היחידות.

- 3.2 – תכן הקונסטרוקציה, שמטפל גם בתכן הכולל של הבניין השלם, בתכן היחידה עצמה, בחיבורים בין היחידות ובחיבור היחידות לממ"דים.
- 3.3 – מערכות השרות האלקטרו-מכניות והסניטריות, תוך פירוט של כל מערכת בנפרד. רמת הפירוט במסמך זה היא הגבוהה ביותר שמצאנו בספרות עבור נושא המערכות.
- 3.4 – בטיחות אש – תוך התייחסות להפרדת אש ולשימוש בחומרים דליקים.
- פרק 4 עוסק בייצור היחידות (4.1 – יחידות מבטון, 4.2 – יחידות מפלדה), תוך הדגמה מפורטת באמצעות מונות רבות של כל שלבי הייצור במפעל.
- פרק 5 עוסק באריזה, שינוע, הובלה, והגנה על היחידה בעת השינוע וההובלה.
- פרק 6 עוסק בלוגיטיקה של תיאום התנועות בין המפעל לאתר, ובתהליכי השינוע לאתר, ההרמה וההעמדה במקום של היחידות.
- פרק 7 עוסק בהרכבה, כולל התייחסות לדיוק המיקום, החיבורים והבטיחות. נושא הבטיחות מפורט מחדש בתת-פרק 10.5 המפרט את הדרישות הקיימות כבר בתקנות של סינגפור לגבי בטיחות הבנייה בשיטות אלה.
- פרק 8 מפרט בפירוט רב את התחומים והנושאים של בקרת האיכות לכל אורך התהליך, כולל תמונות להמחשת המדידות והציוד הדרושים בבדיקות בקרת האיכות.
- פרק 9 עוסק בהוראות תחזוקה ותכולת המדריך למשתמש שיש לספק לדיירים.
- פרק 10 מפרט את המערכת הרגולטורית הרלוונטית, כולל הדרישות החלות בסינגפור על רמת התיעוש הנדרשת מבנייה מסוג זה, כמפורט בטבלה המצוטטת להלן.
- כמו כן כולל המדריך נספח עם תמונות מארבעה פרויקטים שבוצעו ושלושה שנמצאים בביצוע בשיטת ה-PPVC. האחרון בהם הוא בניין מגורים בן 40 קומות עם 505 דירות שנמצא בבנייה עם יחידות מודולריות מבטון (Clement Canopy Condominium at Clement Ave. 1, Singapore).

10.2 Minimum Level of Off-Site Works for PPVC

Elements	Minimum level of completion off-site
Floor finishes	80%
Wall finishes	100%
Painting	100% base coat, only final coat is allowed on-site
Windows frames and glazing	100%
Doors	100%, only door leaves allowed for on-site installation
Wardrobes	100%, only doors are allowed for on-site installation
Cabinets	100%, only doors are allowed for on-site installation
MEP including water and sanitary pipes, electrical conduits and ducting	100%, only equipment to allowed for on-site installation
Electrical sockets and light switches	100%, only light fittings allowed for on-site installation

מראי מקום 14.1-א

Building and Construction Authority, "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA), Prefabricated Prefinished Volumetric Construction". Building and Construction Authority, Singapore.

Gorgolewski, M.T., Grubb, P.J., Lawson, R.M., 2003, "Modular construction using light steel framing: Design of residential buildings". SCI Publication P302. The Steel Construction Institute, UK.

Monash University, 2017, "Handbook for the Design of Modular Structures". Monash University, Modular Construction Codes Board.

Summary

According to the Israeli central Bureau of Statistics (CBS), Israel is expected to reach a population of 15 million by the year 2048. Residential needs are expected to grow rapidly, and reach ~67,000 dwelling units per year in 2036-2040. With existing technologies in Israel, the average construction time is ~26 months per dwelling, and the total construction sector's capacity amounts to no more than 50,000 dwelling units per year. On top of these, there is almost no local source for construction site workers, and the demand for foreign manpower is growing constantly.

To slow down the growing gap between demand and construction capacity, it is essential to increase the performance and efficiency of the construction sector. Industrialization in general is one of the proven means for improving productivity. Modular Construction, the construction technology for high-rise buildings that is based on prefabricated 3D units prefinished in the factory, comprises one of the highest levels of industrialization. This technology is also known as PPVC (Prefabricate Prefinished Volumetric Construction) in Asia and Australia. Experience gained abroad shows that it may become a lever to increasing the construction sector's capacity, in particular for various sorts of residential buildings (including dormitories, apartments for rent, buildings for the elderly, etc.) as well as for some other building types (educational, hostels, hotels, medical, etc.).

In the last decades, experience with implementing Modular Construction in high-rise and tall buildings was gained worldwide (USA, Great Britain, Latvia, Poland, Finland, Sweden, Denmark, Russia, China, Singapore, Japan, Australia, etc.). Lately a residential building of 32 floors has been constructed in Brooklyn NY, and a 40 story building project is under construction in Singapore.

The framework of this research project included the first study of Modular Construction in Israel. It was devoted to an extensive literature survey, collecting as much as possible, exhaustive information and data on the technology's details, know-how, experience in implementation, as well as to examining the feasibility of implementing this technology in the construction of high-rise and tall residential buildings in Israel.

The main activity in Modular Construction takes place in the factory, where large 3D units are produced, usually along a production line (similar to the production of cars and buses). At the end of the line emerges a completely finished 3D room high unit that is ~3.4 m wide and 10 to 16 m long. The unit's structural system would be a main component of the building's final structure. The unit's walls, partitions, ceiling and floor include all the required acoustic and thermal insulation layers. It also includes all the cables, pipes, electrical and sanitary fixtures, flooring and any other fixed items that are relevant to the functional rooms comprised within the unit. According to literature, buildings that are not very tall, usually no more than 6 story-high, can be constructed solely of such units, with no need for additional structural members. Depending on building height and other functions in the building, taller buildings will require a podium and central core constructed in a conventional manner. Very tall buildings may require a load bearing skeleton and non-load bearing units will then be inserted into the skeleton (known as Drawer Buildings, or Capsule Buildings). In Israel, due to protection requirements that enforce protection spaces on each floor, Modular Construction will include a concrete core at any height of the building project.

Units are manufactured in the factory along several production lines in parallel, according to their order of site assembly. Assembly on site is fast, and it is possible to reach a pace of 6 to 10 units per day. One of the most remarkable features of Modular Construction is thus the fast completion of a construction project, shortening the total project period by tens of percent. When the factory is not too far from the construction site (as would be for a factory in Israel) the units are shipped to the site according to the pace of assembly on site and unloaded from the truck directly to their final position in the building ("Just in Time" process), without any need for additional storage area. When purchased abroad and shipped by sea to their final destination (as will probably be the situation during the first years of implementation in Israel), there is a need to ship a large amount of units in each batch, with interim storage on the manufacturer's side as well as on the client's side, requiring large dedicated storage areas and interim crane hours.

At the construction site there would still be some conventional wet construction activity (podium and core), but the part that is based on Modular Construction, which is the majority of the built area, comprises only dry and clean works. These include: assembly

alignment and leveling, various structural connections, interfacing of units' piping and electrical cables to the common systems within the main core or shafts, insertion of fire stops and seals, application of water protection and seals, and at the roof level – application of thermal insulation, water protection layers and final finishes.

Performing all works in the factory at normal working height and good accessibility to every item, with comfortable working conditions, excellent safety conditions and a socially solid working environment, workers' output is improved and quality of the units in general, as well as of specific building details, is much better than in conventional construction on site. The well planned works in the factory also enable recycling of materials and much less construction wastes. The major reduction of total manpower hours on site reduces safety risks and increases total safety on site. It should be recognized, however, that working with high capacity cranes and transporting and assembling heavy units comprise an increased safety risk that must be handled appropriately. Although transporting 6 to 10 units per day to the construction site, the total transportation load around the construction site is reduced due to less manpower on site and almost no need for transporting individual components and materials. As works on site are mostly dry, there is hardly any disturbance to the nearby neighborhood.

Modular Construction requires that planning and design are completed before manufacturing of a unit starts in the factory. There is hardly any tolerance for design changes later on. This requires a conceptual change of the design and construction process. It is thus expected that at the beginning of implementing the technology in Israel, some failures may occur that would stem from the old way of project management, but after a learning period all stakeholders will recognize the advantages of the new process and will become adjusted to it. Nevertheless, due to the completion of detailed planning and design at an early stage, it is also possible to plan and design quite accurately the schedule, costs and cash flow along the entire project's process, and these materialize without major discrepancies. Consequently, credibility increases between all stakeholders, and the Modular Construction project ends with very few disputes and litigations.

Accumulated experience abroad proved that the following technological advantages can be fully realized: reduction of total project duration by 35% to 65%; good control of construction details, with reduction of faults and improved final quality; reduction of site manpower by 50% to 75%, and 3 to 4 times increased productivity; increase safety on site by 3 to 4 times along the whole project; reduction of wastes by 90%, of site deliveries by 60%, and of workers and materials transportation by 70%; major reduction of noise and dust impacts on the nearby neighborhood; and major improvement of the working conditions of all workers associated with a given project.

The research included a survey of Israeli professionals' perceptions of Modular Construction. It showed, as in similar investigations abroad, that the professional sector recognizes the technological listed above merits of the technology, but points also at some disadvantages, which stem mainly from lack of familiarity with handling the technology's subtleties. The main disadvantages that were pointed out include: The need for early stage collaboration between all stakeholders, and taking into account the technology as early as the initial stage of conceptual design; the crucial importance of completing detailed design before starting manufacturing the units; transportation restraints and their effects on size, cost and structural details; lack of possibility to make changes to the design during construction, and low flexibility to future changes during occupancy; high initial cost of starting a factory, in particular under uncertainty of its continuous activity; aesthetic concerns stemming for the repeatability of modular units and visual appearance of interfaces and joints; professional knowledge gaps; the fact that the technology is economically advantageous only when and where manpower is expensive (either due to lack of construction workers, or due to their high salaries).

In a large professional brain storming meeting, held within the project's framework, the participants claimed that the above mentioned disadvantages can be overcome, and should not be regarded as barriers to implementation of Modular Construction in Israel. The first step towards overcoming them is actually this Hebrew written report that was written within the project. It introduces the technology to the local construction sector (including a detailed literature review of some 150 references in Appendix A, and a technical guide in Chapters 8.1 to 8.5). Besides the non-detrimental disadvantages, a non-technological handicap, which may become a serious barrier to the implementation,

was mentioned in the meeting: uncertainty of potential users' responses to Modular Construction that may stem from the general prejudice against prefabricated construction. Such uncertainty prevents the private sector from starting any high-rise project in Modular Construction, and it is almost impossible to neutralize its effects as long as the prejudice and stigma are not abolished.

Despite this serious barrier, the meeting participants, as well as the professionals' perceptions survey, claimed that the technology has to be implemented in Israel, and that this should occur as soon as possible, but that the move must be led by the government (mainly the Ministry of Construction and Housing), manufacturers, and academia (to overcome the lack of private initiative).

An additional important question addressed within the framework of this research was: to what extent and under which conditions Modular Construction can be economically valid in Israel? A basic (clearly disadvantageous) assumption in this investigation was that the units will be purchased from a factory abroad (Poland, Latvia, or elsewhere in Europe), and that this is going to be the situation during the experimental first stage of several years. Results showed that the technology may be economically advantageous to the individual entrepreneur only if direct costs are by ~10% lower than in conventional construction (which may occur only in later stages, after local factories are built and the technology becomes part of the routine). However, from the macroeconomic viewpoint of the government, it can be economically viable even at the first stage, mainly due to its additional advantages that stem from reduced wastes, lowered impact on the environment, and increased worker safety (a detailed economic investigation is reported in Sections 8.6.1 to 8.6.7).

Based on all the above, we found that **implementing Modular Construction technology for high-rise buildings in Israel has the potential to advance the construction sector, to improve its image, and to raise its status to that of the manufacturing industries**, such as of cars, buses, airplanes, and ships.

Despite this observation and the mentioned advantages, the technology's innovative nature, the lack of local experience with its application in high-rise buildings, and the connotation as PreFab stop potential entrepreneurs from "diving into an adventure".

Consequently, in order to maximize the technology's overall advantages, it is recommended to get organized towards its introduction into the Israeli building sector in the framework of a proactive initiative under state leadership. To overcome prejudice and stigma, it is extremely important that the introduction process is carefully structured, with a strong emphasis on excellence along the whole process, including in design, manufacturing and construction, to be demanded of all stakeholders.

In view of the advantages of Modular Construction and the high chance that the technology can be economically worthwhile, it is recommended to start **a pilot to be led by the Ministry of Construction and Housing**, with an embedded incentive for included entrepreneurs. As local manufacturers do not have any experience with implementing the technology in high-rise construction, it is recommended that at first stage units will be purchased abroad (at least during the first 3 years), and that at the initial stage the factory will also provide the assembly teams, with Israeli construction teams working side by side to learn carefully all the details of proper workmanship (including accurate alignment and leveling, structural connections, water protection, fire sealing, etc.).

To overcome the threats of uncertainty and risk that entrepreneurs are facing, **the pilot should be organized in a framework of incentive/compensation**. The report includes several suggested models for such frameworks: A – safety net model with a behavioral incentive. This can be applied at the level of individual dwellings, or at the whole building level; B – safety net and incentive model based on tax reductions; C – a leasing model with buying options (along or at the end of the leasing period). The models are described, detailed, discussed and accompanied with examples of their outcomes in Section 8.6.8 of the report, but the preferred model should be chosen by the governmental body that would lead the pilot.

Towards activating the pilot, **there is a need to get well organized in several preliminary steps**. These include:

- **Establishing a clear and systematic infrastructure**, which provides potential entrepreneurs with all the information they need and all the requirements they have to meet in order to become a candidate for the pilot, as well as the criteria to be chosen.

- **Appointing a professional advisory committee** that will assist with establishing criteria for choosing the pilot projects and will participate in the examination of submitted proposals.
- It must be assured that in any tendering system to be used for choosing the entrepreneurs, **the proposal's excellence is a high importance factor in the decision making criteria.**
- As a prerequisite for objectivity and qualified decisions, it should be reassured that **the particular building systems** entering pilot candidacy **have demonstrated their design and construction suitability**, and, like any innovative building system, **have been investigated and approved** by the Investigation and Approval Unit of the (Israeli) National Building Research Institute.

It is recommended to establish a follow-up research project that will investigate the actual performances of the pilot projects. The investigated performances should address the process (from initial stages of planning, design, and collaboration between all stakeholders, to shipping and transfer of the units, site assembly, connections and all other site works and finishes), the time schedules, the quality, and any actual drawbacks that occur along the project.



Founded By
Ministry of Construction and Housing
Technion-Israel Institute of Technology
Faculty of Civil & Environmental Engineering

מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון
הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2025217

Industrialization of Residential Buildings Using 3D Modular Units – Architectural, Engineering and Construction Aspects

Assoc. Prof. R. Becker Assoc. Prof. Y.J. Grobman

Dr. G. Raviv Assoc. Prof. Y. Rosenfeld

Arch. N. Chen Dr. I. Leviathan A. Maayan, M.Sc.

M. Tavor, M.Sc. G. Trajtenberg, M.Sc.

Copyright © 2019 by R. Becker, Y.J. Grobman, G. Raviv, Y. Rosenfeld, N. Chen,
I. Leviathan, A. Maayan, M. Tavor, G. Trajtenberg,
The Israeli Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

September 2019

המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003
National Building Research Institute, Technion City, Haifa 3200003, Israel
טל. 972-4-8292242/3
<http://nbri.net.technion.ac.il>
e-mail: nbri@tx.technion.ac.il

