

לכבוד חברת FLOOR3 – חברת ארגיל

ליווי הדו"ח וכתובת היבטים תרמיים – חברת SID  
ניתוח חיסכון בעלויות השלד – חברת Structure-Pal

תאריך הגשת הדו"ח: 22/11/22



# בדיקת מקרה מבחן לבניין בן 24 קומות

חסכון בבנייה הודות לשימוש בבטון "תרמוקל - TFC"

## בדיקת מקרה המבחן

### הפחתת עלויות בניה כתוצאה משימוש בטון TFC למצעי ריצוף וגגות במקום שיטות מקובלות בישראל

חברת Floor 3, מקבוצת ארגיל, מייצרת בטון מוקצף קל משקל, המשמש כתשתית חלופית למצעי ריצוף (במקום חול וחצץ) ובטון שיפועים בגגות. החברה הזמינה מאיתנו הערכה מחקרית אובייקטיבית לתועלות הישירות והחסכון הכספי שהמוצר יכול לתרום במהלך בנייה של מבנים בשיטות הבניה המקובלות בישראל.

### רקע

בטון TFC (Thermal Foam Concrete) הוא בטון מוקצף קל משקל ובעל ערכים תרמיים משופרים. לאור זאת הנחת העבודה היא ששימוש בו יכול לחסוך עלויות באופן ישיר כתוצאה מתכנון שלד שלוקח בחשבון הפחתת עומס של כ-200 ק"ג לכל מ"ר רצפה מול חלופה של מילוי בחול או חצץ "סומסום". הבדיקה נועדה לבחון הנדסית את האפשרות להפחתת עובי בטון קונסטרוקטיבי תקרות, כמות פלדת הזיון וכן הפחתה בכמות הפלדה והבטון הנדרשים ביסודות המבנה כתוצאה מהפחתת משקל המבנה הכולל.

בנוסף, מכיוון שלמערכת בטון TFC יש ערך תרמי משופר, נערכה בדיקה שלו מול הדרישות של תקן 1045 והאפשרות לוותר על שימוש בלוחות בידוד תרמי באזורים מסוימים במבנה. גם כאן טמון חיסכון ישיר בעלויות בניה והוא מוצג בעבודה זו.

### תקציר תוצאות ומסקנות לגבי החסכון הכולל למבנה הנבדק:

מתוצאות בדיקת השלד לגבי המערכת כולה נמצא חיסכון כולל של 10.6% בכמויות חומרי בניה המתורגם לחיסכון של כ-94 ₪ למ"ר רצפה בחישוב על פי מחיר בטון ופלדה (לפי מחירון דקל 3/2017). חסכון המשקל הכולל של המבנה כתוצאה משימוש במצע בטון סופר קל D300 כתחליף לחצץ "סומסום" הפחית כ-14% ממשקל המבנה הכולל. ככל שהמבנה גבוה יותר, כך החיסכון הכולל צפוי להיות גדול יותר.

מהבדיקות התרמיות לאזור אקלימי ב', נמצא כי הבטון TFC מיתר את הצורך בשימוש בפוליסטירן לבידוד תרמי בגגות, בקומות מעל חלל לא מחומם או מעל חלל חיצוני וכן מספק מענה לגשרי קור ברצפה. במבנה שנבדק בסימולציה אנו מעריכים שיש צורך בכ-1,200 מ"ר פוליסטירן (קלקר) לבידוד רצפות וגגות המבנה בעלות יישום של כ-30 ₪ למ"ר (כולל עבודה) לכל מ"ר מהשטח שבו נדרש הבידוד התרמי. השימוש בבטון TFC חוסך את הצורך בשימוש בפוליסטירן ובכך חוסך כ-36,000 ₪ של עלות יישום הפוליסטירן ברצפות ובגג המבנה.

### סיכום שקלול חיסכון בשלד + חסכון בבידוד תרמי ברצפות וגג המבנה:

סה"כ חיסכון [₪]	-1,377,000
סה"כ חיסכון [%]	-10.85%
סה"כ חיסכון למ"ר [₪\מ"ר]	-96.50

## בדיקת שלד הבטון

חברת Structurepal פיתחה מערכת על בסיס בינה מלאכותית, אשר מסייעת למהנדס השלד לתכנן באופן מהיר שלד בטון אופטימלי, תוך עמידה בתקנים, התחשבות בתמחירים, הגבלות אדריכליות והפחתת טביעת רגל פחמנית. מערכת הבינה המלאכותית עורכת סימולציות שבהן מוגדרים נתוני מבנה וחומרים והיא מסייעת למהנדסים לעשות אופטימיזציה ולמצא את המינימום של כמויות בטון וברזל הנדרשים. הבדיקה בוצעה בהובלת אינג' יואב חכימי.

לצורך הבדיקה נבחר מבנה מגורים טיפוסי בן 24 קומות הנבנה בשיטות שלד בטון המקובלות בשוק. לצורך השוואה נלקח בחשבון מילוי בטון TFC "D300" במשקל מרחבי 300 ק"ג/מ"ק מול חלופה של מילוי חצץ "סומסום" במשקל מרחבי 1,600 ק"ג/מ"ק.

גובה המילוי בקומה סטנדרטית חושב 15 ס"מ מפני בטון עד פני ריצוף, וגובה מילוי ממוצע בקומת פנטהאוז 30 ס"מ. בגג נלקח בחשבון גובה בטון ממוצע של 20 ס"מ (לצורך שיפועים).

ההשוואה בוצעה ע"י שימוש בתוכנת אופטימיזציה לתכנון שלד הבטון של חברתנו, סכמת המבנה וכן כל החתכים עבור תהליך אופטימיזציה לקבלת השלד הכלכלי ביותר אשר עומד לדרישות תכנן בטון ת"י 466, רעידות אדמה ת"י 413 ורוח ת"י 414. תהליך האופטימיזציה כולל אנליזות לחישוב השקיעות והכוחות המתפתחים באלמנטי השלד, כל האנליזות בוצעו בעזרת תוכנת אלמנטים סופיים ROBOT מבית Autodesk. לצורך השוואה נלקחו בחשבון עלויות הבטון והפלדה בהתאם למחירון דקל.

מקרה מבחן זה נבדק לפי הנחות עבודה שמרניות מבלי לשנות את גיאומטריית המבנה. בפועל ככל הנראה שבבדיקה ותכנון מחודש של מבנה (תכנון גיאומטרי חדש), ניתן להגיע לתוצאות אפילו טובות יותר.

תוצאות הבדיקה מובאות במסמך להלן -

בחינת השפעה על שלד המבנה בשימוש מוצר בטון TFC למילוי בתשתית לריצוף של חברת Floor 3 מקבוצת ארגיל

**נתוני המוצר – D300**

משקל מרחבי: 300 ק"ג למ"ק

השוואה בין המוצר לסומסום:

הפרש	סומסום	D300	משקל [ק"ג/מ"ק]
-81%	1,300	1,600	300

חישוב עומסים עבור מבנה מגורים

גג - עומס קבוע נוסף ושימושי [טון/מ"ר]			
הפרש	בטקל	D300	
0%	0.00	0.00	ריצוף 2 [ס"מ]
0%	0.00	0.00	מחיצות
-78%	308.00	68.00	שיפועים 22 [ס"מ]
<b>-78%</b>	<b>308.00</b>	<b>68.00</b>	<b>סה"כ קבוע נוסף</b>
0%	150.00	150.00	שימושי
<b>-52%</b>	<b>458.00</b>	<b>218.00</b>	<b>קבוע נוסף + שימושי</b>

קומה טיפוסית - עומס קבוע נוסף ושימושי [טון/מ"ר]			
הפרש	סומסום	D300	
0%	44.00	44.00	ריצוף 2 [ס"מ]
0%	150.00	150.00	מחיצות
-81%	208.00	39.00	מילוי 13 [ס"מ]
<b>-42%</b>	<b>402.00</b>	<b>233.00</b>	<b>סה"כ קבוע נוסף</b>
0%	150.00	150.00	שימושי
<b>-31%</b>	<b>552.00</b>	<b>383.00</b>	<b>קבוע נוסף + שימושי</b>

מרפסות - עומס קבוע נוסף ושימושי [טון/מ"ר]			
הפרש	סומסום	D300	
0%	44.00	44.00	ריצוף 2 [ס"מ]
0%	0.00	0.00	מחיצות
-81%	208.00	39.00	מילוי 13 [ס"מ]
<b>-67%</b>	<b>252.00</b>	<b>83.00</b>	<b>סה"כ קבוע נוסף</b>
0%	350.00	350.00	שימושי
<b>-28%</b>	<b>602.00</b>	<b>433.00</b>	<b>קבוע נוסף + שימושי</b>

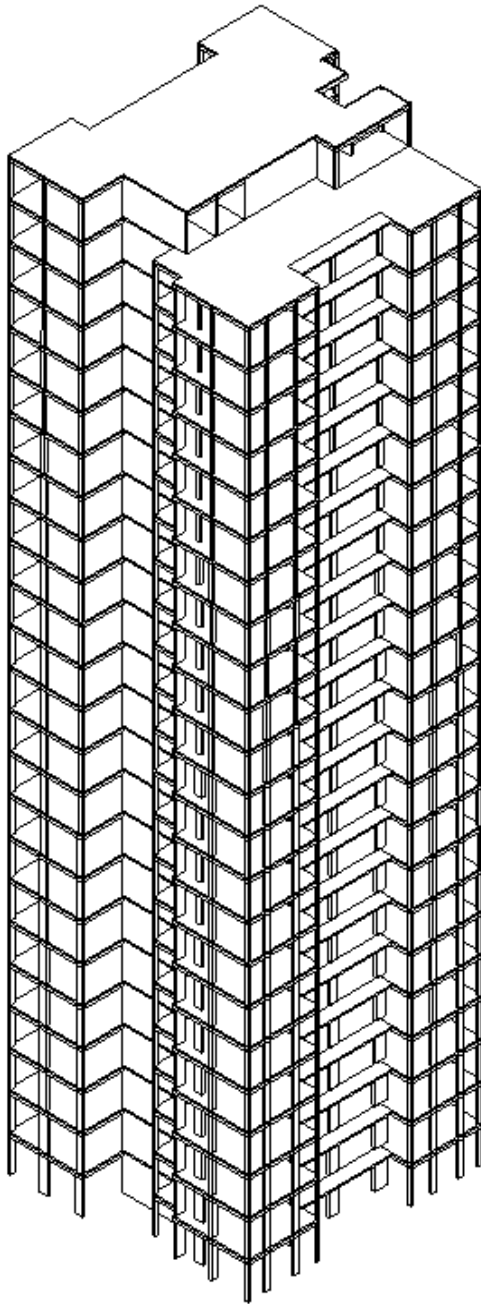
פנטהאוז - עומס קבוע נוסף ושימושי [טון/מ"ר]			
הפרש	סומסום	D300	
0%	44.00	44.00	ריצוף 2 [ס"מ]
0%	150.00	150.00	מחיצות
-81%	448.00	84.00	מילוי 28 [ס"מ]
<b>-57%</b>	<b>642.00</b>	<b>278.00</b>	<b>סה"כ קבוע נוסף</b>
0%	150.00	150.00	שימושי
<b>-46%</b>	<b>792.00</b>	<b>428.00</b>	<b>קבוע נוסף + שימושי</b>

מקרה בוחן

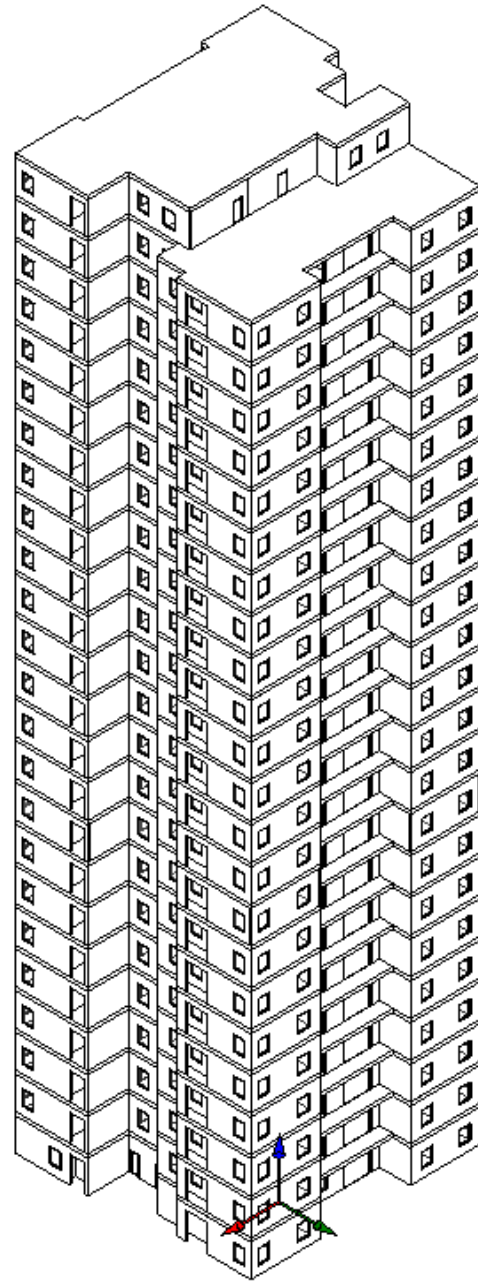
כמקרה בוחן נבחר מבנה מגורים רב קומות בן 24 קומות, להלן נתוני הפרויקט:

נתוני הפרויקט

24	מספר קומות מעל הקרקע
605	שטח קומה טיפוסית [מ"ר]
14,265	שטח כולל [מ"ר]
4	מס דירות בקומה טיפוסית



מודל הנדסי



מודל אדריכלי

בחלופה של הסומסום עובי התקרה הטיפוסית הינו 20 ס"מ, בחלופה של בטון TFC 18 ס"מ, הפחתה של 10% בעובי התקרה. בפנטהאוז רואים הפחתה משמעותית יותר, בסומסום 24 ס"מ ובבטון TFC 19 ס"מ, הפחתה של 20% בעובי התקרה. בנוסף להפחתה בעובי התקרה ניתן לראות גם הפחתה בכמויות הזיון.

בהתאם לנתוני המבנה ע"י שימוש בבטון D300 TFC לעומת שיטת הבניה הנוכחית באמצעות סומסום, ניתן להגיע לחיסכון כולל של 1,341,000 ₪ המהווים 10.6% מסך עלות השלד, וכן הפחתה של 336,335 טון CO<sub>2</sub>. בנוסף ניתן לראות הפחתה של 14% בריאקציות (העומס היורד ליסודות) וכ-18% בכוחות האופקיים המפתחיים על המבנה אשר באים לידי ביטוי בחיסכון עלויות השלד והיסודות.

**להלן סיכום התוצאות**

סה"כ חיסכון [₪]	-1,340,969
סה"כ חיסכון [%]	-10.6%
סה"כ חיסכון למ"ר [₪/מ"ר]	-94.00

לסיכום, באמצעות שימוש במוצר בטון קל, כחומר מילוי לתשתית הריצוף, ניתן להגיע לחיסכון של כ-1,341,000 ₪, הפחתה של כ-18% בכוחות האופקיים הפועלים על המבנה, וכן הפחתה של כ-336,300 טון CO<sub>2</sub> בשלד של מבנה מגורים בן 24 קומות.

**תוצאות נוספות וחישובי ביניים**

הפרש באחוזים	הפרש	סומסום	D300	
-10.00%	-2	20	18	עובי תקרה טיפוסית [ס"מ]
-20.83%	-5	24	19	עובי רצפת פנטהאוז [ס"מ]
-10.82%	-641	5,925	5,283	סה"כ קו"ב בטון מבנה עליון [מ"ק] *
-11.63%	-84	721	637	סה"כ פלדה אומדן מבנה עליון [טון]**
-14.03%	-23,819	169,827	146,008	משקל מבנה (ריאקציות SLS) [טון]
-10.56%	-1,340,969	12,693,144	11,530,202	עלות שלד אומדן [₪]**
-11.35%	-336,335	2,962,602	2,626,267	פליטות פחמן [kgCO <sub>2</sub> e]***

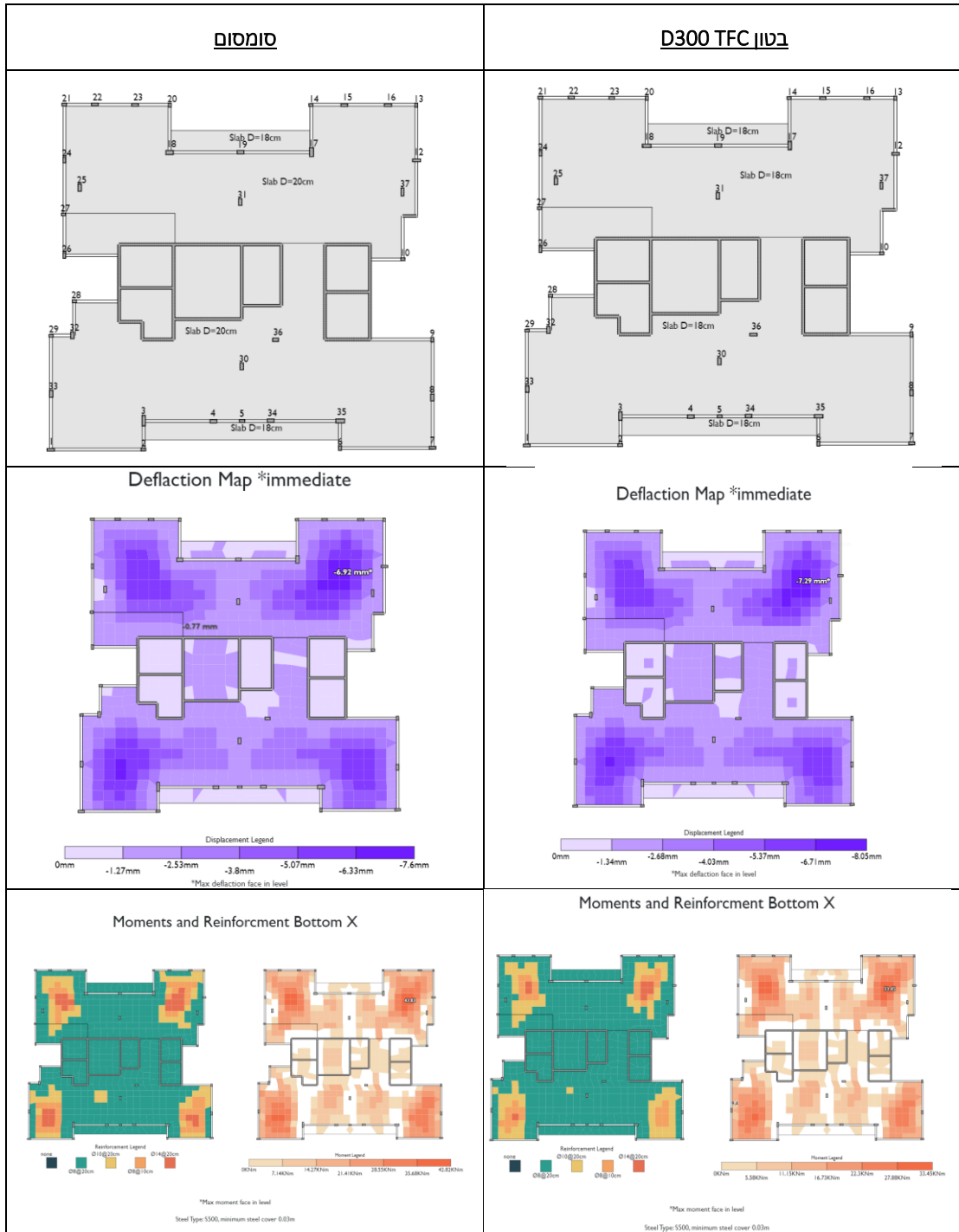
\* סה"כ מ"ק בטון כולל חישוב חתכים של תקרות, קורות, עמודים וקירות, ואומדן כמות לחישוב יסודות.  
\*\* עלויות לפי מחירון דקל 3/2017. כמויות פלדה לפי אומדן.  
\*\*\* מקדמי פליטות נלקחו מ: Engineers The institute of Structural

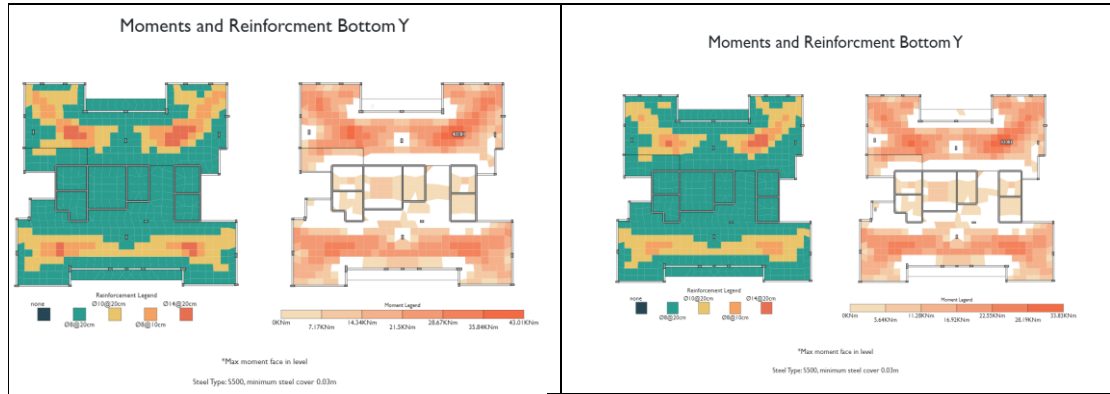
**כוחות אופקיים - רעידות אדמה**

הפרש באחוזים	הפרש	סומסום	D300	
-19%	-122	627	505	כוח מקסימלי בראש המבנה - קומה 24 [ק"נ]
-17%	-54	317	263	כוח קומה 23 [ק"נ]
-20%	-3	15	12	כוח קומת קרקע [ק"נ]

**אומדן חיסכון ביסודות**

עלות ממוצעת של השלד למ"ר [₪/מ"ר]	890
עלות ביסוס המבנה מסך עלות השלד	10%
שטח המבנה [מ"ר]	14,265
ריאקציות [ק"נ]	-14%
חיסכון מוערך ביסודות [₪]	-178,027





הבדיקה בוצעה ע"י חברת Structure-Pal בע"מ, בהובלת אינג' יואב חכימי. *CA*



## ניתוח תרומת הבטון TFC לבידוד התרמי של המבנה

בחלק זה של הדוח מובאת התייחסות לתרומתו של הבטון TFC בהיבט התרמי, נראה את המקרים בהם הבטון TFC מחליף לחלוטין את הצורך ביישום שכבות בידוד נוספות כדוגמת פוליסטירן (קלקר) בגגות וברצפות. הבדיקה נערכה ע"י ד"ר אדריכל נעם אוסטרליץ יועץ תרמי ומומחה לבניה ירוקה.

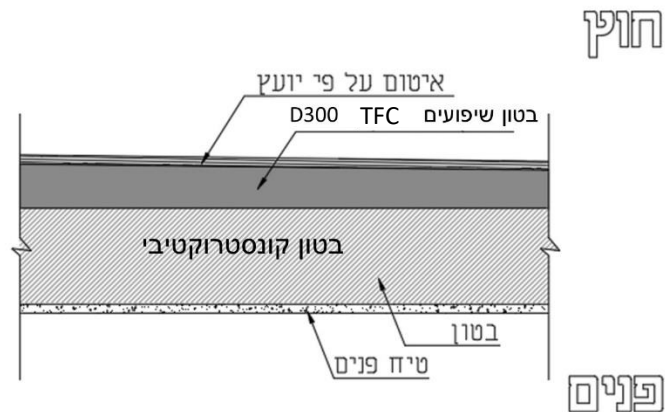
להלן הערכים התרמיים של הבטון TFC בצפיפויות השונות שנמצאו בבדיקות מעבדת מכון התקנים הישראלי שבדקה את מדגמי הבטון TFC (הבדיקה מובאת באתר "SID-center").\*:

מקדם מוליכות תרמית (W/m*K)	משקל מרחבי (kg/m <sup>3</sup> )	סוג הבטון הסופר קל
0.08	275	D300
0.1	365	D400
0.14	485	D500

### תפקוד בטון TFC כבידוד גג באזור אקלימי ב':

בבדיקת חתך אופייני של גג באזור אקלימי ב', ביישום בטון שיפועים D300 TFC מעובי 12 ס"מ, הבטון TFC מחליף ומיתר את הצורך בשימוש בלוחות פוליסטירן (קלקר):

### להלן חתך גג טיפוסי עם בטון שיפועים TFC:



### פרט סכמטי לחתך גג עם בטון סופר קל

**להלן החישוב התרמי לחתך הגג הנ"ל:**

ניתן לראות כי מתקבלת התנגדות תרמית של  $R = 1.62$  שעונה על הנדרש בת"י 1045 למקרה באזור אקלים ב' (מינימום  $R = 1.5$ ):

גג עליון					אזור אקלימי: ב	
מרכיב מערכת (חוץ לפנים)	עובי השכבה	מוליכות תרמית חישובית	מסה סגולית	מסה תרמית אפקטיבית	התנגדות תרמית אופיינית	
	d [cm]	$\lambda$ [Watt/(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	W [Kg/m <sup>2</sup> ]	r [(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )/Watt]	
בטון D 300 TFC	12.0	0.080	300	0	1.500	
בטון	20.0	2.000	2,400	240	0.100	
טיח (סיד-צמנט)	2.0	1.000	1,800	18	0.020	
<b>סה"כ עובי קיר</b>	<b>34.0</b>					
<b>התנגדות תרמית אופיינית כללית - r</b>	<b>דרישת 1045</b>	<b>התנגדות תרמית פניית</b>	<b>R</b>	<b>הולכה (U)</b>	<b>מסה סגולית</b>	<b>1.62</b>
	1.50	0.14	1.76	0.57	258	

**תפקוד בטון TFC כבידוד חלל מחומם מעל חלל לא מחומם:**

במבנים בהם קיים חלל מחומם מעל חלל לא מחומם, כדוגמת דירת מגורים מעל חניון, יש צורך ליישם שכבה של בידוד ברצפת הדירה. במקרה של שימוש בבטון TFC כמצע לריצוף במקום חצץ "סומסום", הבטון TFC משמש כמבודד תרמי וחוסך את הצורך להוסיף לוחות בידוד ברצפת הדירה מעל החלל הלא מחומם (כדוגמת לוחות פוליסטירן המיושמים על גבי הרצפה הקונסטרוקטיבית ומתחת למצע חצץ ה-"סומסום").

ניתן לראות בטבלת החישוב להלן כי ערך ההתנגדות התרמית המתקבל משכבת מצע בטון TFC בעובי 4 ס"מ בלבד, מספקת התנגדות תרמית של  $R = 0.52$  העונה על הנדרש בתקן (מינימום  $R = 0.5$ ) לרצפת חלל מחומם באזור אקלימי ב':

רצפה מעל חלל לא מחומם					אזור אקלימי: ב	
מרכיב מערכת (חוץ לפנים)	עובי השכבה	מוליכות תרמית חישובית	מסה סגולית	מסה תרמית אפקטיבית	התנגדות תרמית אופיינית	
	d [cm]	$\lambda$ [Watt/(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	W [Kg/m <sup>2</sup> ]	r [(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )/Watt]	
בטון D 400 TFC	4.0	0.100	400	16	0.400	
בטון	20.0	2.000	2,400	240	0.100	
טיח (סיד-צמנט)	2.0	1.000	1,800	18	0.020	
<b>סה"כ עובי קיר</b>	<b>26.0</b>					
<b>התנגדות תרמית אופיינית כללית - r</b>	<b>דרישת 1045</b>	<b>התנגדות תרמית פניית</b>	<b>R</b>	<b>הולכה (U)</b>	<b>מסה סגולית</b>	<b>0.52</b>
	0.50	0.34	0.86	1.16	274	

הערה: במרבית הדירות עובי שכבת המצעים נעה סביב 10 ס"מ בממוצע, כלומר בשימוש בבטון TFC, נשוי בידוד משופר בהרבה מעל דרישות התקן לחלל מחומם מעל חלל שאינו מחומם.

**תפקוד בטון TFC בבידוד רצפה מעל חלל פתוח:**

גם במקרה זה, ניתן לראות שבטון D400 TFC בעובי שכבה מינימלית של 7 ס"מ, מחליף לחלוטין את הצורך ביישום לוחות פוליסטירן ברצפת החלל המחומם הגובלת בחלל שלא מחומם (מתקבל ערך  $R=0.82$  לעומת הדרישה בת"י 1045 ל  $R=0.75$ ):

רצפה מעל חלל פתוח					אזור אקלימי: ב	
מרכיב מערכת (חוץ לפנים)		עובי השכבה	מוליכות תרמית חישובית	מסה סגולית	מסה תרמית אפקטיבית	התנגדות תרמית אופיינית
		d [cm]	$\lambda$ [Watt/(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )]	$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	W [Kg/m <sup>2</sup> ]	r [(m <sup>2</sup> *K <sup>2</sup> )/Watt]
בטון D 400 TFC		7.0	0.100	400	28	0.700
בטון		20.0	2.000	2,400	240	0.100
טיח (סיד-צמנט)		2.0	1.000	1,800	18	0.020
<b>סה"כ עובי קיר</b>		<b>29.0</b>				
<b>התנגדות תרמית אופיינית כללית - r</b>					<b>הולכה (U)</b>	<b>מסה סגולית</b>
0.82					R	286
			התנגדות תרמית פנית		0.97	0.21
			זדישת 1045			0.75

**תפקוד בטון TFC בבידוד גשרי קור – רצפה פנימית במבנה:**

כיום, במבנים בהם מבוצע בידוד תרמי פנימי בקירות וכן במקרים בהם מבוצע בידוד תרמי חיצוני ובמפגשים עם מרפסות זזיות, יש ליישם ברצפת הדירה רצועת בידוד תרמי ברוחב מינימלי של 0.5 מ' כדי לספק מענה לגשרי הקור. בעת השימוש בבטון TFC, ביישום עובי מינימלי של 5 ס"מ, הבטון TFC מספק את הבידוד התרמי הנדרש ונחסך הצורך ליישום רצועת בידוד ברצפה הדירה לאורך הקיר החיצוני.

**הערה:** הבטון TFC אינו מיתר את הצורך ביישום רצועת בידוד בתקרת הדירה לטיפול בגשרי הקור.

**סיכום ומסקנות – החסכון הכולל בעלות בידוד למבנה הנבדק:**

מהבדיקות התרמיות לאזור אקלימי ב', נמצא כי הבטון TFC מיתר את הצורך בשימוש בפוליסטירן לבידוד תרמי בגגות, בקומות מעל חלל לא מחומם או מעל חלל חיצוני וכן מספק מענה לגשרי קור ברצפה. במבנה שנבדק בסימולציה אנו מעריכים שיש צורך בכ-1,200 מ"ר פוליסטירן (קלקר) לבידוד רצפות וגגות המבנה בעלות יישום של כ-30 ש"מ (כולל עבודה).

השימוש בבטון TFC חוסך את הצורך בשימוש בפוליסטירן ובכך חוסך כ-36,000 ₪ של עלות יישום הפוליסטירן ברצפות ובגג המבנה.