

לכבוד חברת FLOOR3 – חברת ארגיל

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

תאריך הגשת הדו"ח: 09/04/22



בדיקת מקרה מבחן

חסכון בבנייה הודות לשימוש בבטון "סופר-קל"

בדיקת מקרה המבחן

הפחתת עלויות בניה כתוצאה משימוש בטון סופר-קל 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) ובבטון 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 סופר-קל 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 סופר-קל 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 7.2% בכמויות חומרי בניה המתורגם לחיסכון של כ-49 ש"ח 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-20% ממשקל המבנה הכולל. ככל שהמבנה גבוה יותר, כך החיסכון הכולל צפוי להיות גדול יותר.

מהבדיקות התרמיות לאזור אקלימי ב', נמצא כי הבטון הסופר-קל 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"ח למ"ר (כולל עבודה). השימוש בבטון הסופר קל חוסך את הצורך בשימוש בפוליסטירן ובכך חוסך כ-36,000 ש"ח של עלות יישום הפוליסטירן ברצפות ובגג המבנה.

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

סה"כ חיסכון [ש"ח]	-320,832
סה"כ חיסכון [%]	-7.84%
סה"כ חיסכון למ"ר [ש"ח/מ"ר]	-55.30

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 10 קומות הנבנה בשיטות שלד בטון המקובלות בשוק. לצורך השוואה נלקח בחשבון מילוי בטון סופר-קל "D300" במשקל מרחבי 300 ק"ג/מ"ק מול חלופה של מילוי חצץ "סומסום" במשקל מרחבי 1,600 ק"ג למ"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).

סכמת המבנה וכן כל החתכים עבור תהליך אופטימיזציה לקבלת השלד הכלכלי ביותר אשר עומד לדרישות ת"י 466.

ההשוואה בוצעה ע"י שימוש בתוכנת אופטימיזציה לתכנון שלד הבטון. 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.

יש לציין שככל שהמבנה גבוה יותר, התרומה של הפחתת המשקל משמעותית יותר. כמו כן, קיימים אלמנטים ספציפיים שבהם ההפחתה היא אפילו משמעותית יותר, למשל, הפחתת משקל במרפסות זיזיות כתוצאה משימוש בבטון הסופר קל מביאה במקרים מסוימים לחיסכון של מעל 40% בבטון ופלדה באלמנטים אלו.

תוצאות הבדיקה מובאות במסמך להלן -

בחינת השפעה על שלד המבנה בשימוש מוצר בטון סופר קל למילוי כתשתית 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]
-78%	308.00	68.00	סה"כ קבוע נוסף
0%	150.00	150.00	שימושי
-52%	458.00	218.00	קבוע נוסף + שימושי

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]
-42%	402.00	233.00	סה"כ קבוע נוסף
0%	150.00	150.00	שימושי
-31%	552.00	383.00	קבוע נוסף + שימושי

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]
-67%	252.00	83.00	סה"כ קבוע נוסף
0%	350.00	350.00	שימושי
-28%	602.00	433.00	קבוע נוסף + שימושי

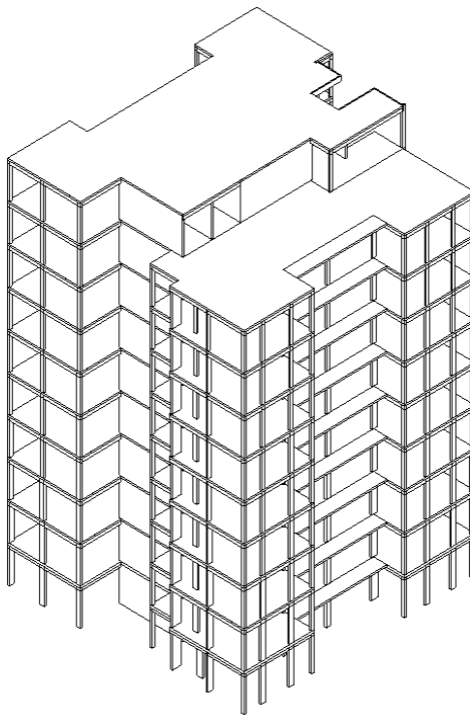
פנטהאוז - עומס קבוע נוסף ושימושי [טון/מ"ר]			
הפרש	סומסום	D300	
0%	44.00	44.00	ריצוף 2 [ס"מ]
0%	150.00	150.00	מחיצות
-81%	448.00	84.00	מילוי 28 [ס"מ]
-57%	642.00	278.00	סה"כ קבוע נוסף
0%	150.00	150.00	שימושי
-46%	792.00	428.00	קבוע נוסף + שימושי

מקרה בוחן

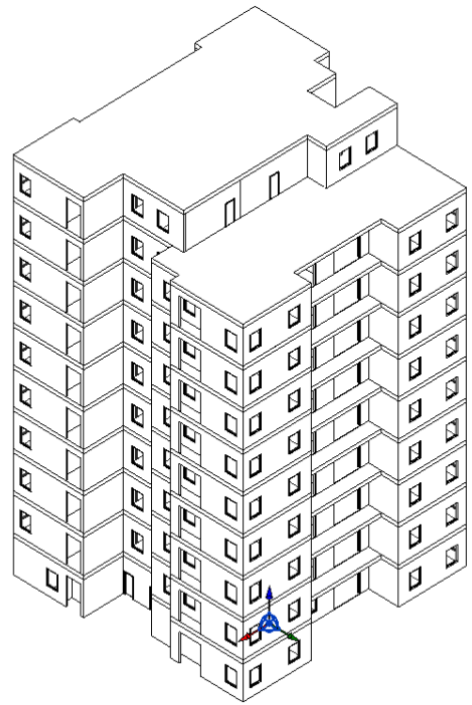
כמקרה בוחן נבחן מבנה מגורים בן 10 קומות, להלן נתוני הפרויקט:

נתוני הפרויקט

10	מספר קומות מעל הקרקע
615	שטח קומה טיפוסית [מ"ר]
5,805	שטח כולל [מ"ר]
4	מס דירות בקומה טיפוסית



מודל הנדסי



מודל אדריכלי

תוצאות:

בחלופה של הסומסום עובי התקרה הטיפוסית הינו 20 ס"מ, בחלופה של בטון קל 18 ס"מ, הפחתה של 10% בעובי התקרה. בפנטהאוז רואים הפחתה משמעותית יותר, בסומסום 24 ס"מ ובבטון קל 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 קל D300 לעומת שיטת הבניה הנוכחית באמצעות סומסום, ניתן להגיע לחיסכון כולל של 284,832 ₪ המהווים 7.2% מסך עלות השלד, וכן הפחתה של 71.5 טון CO2.

להלן סיכום התוצאות

סה"כ חיסכון [₪]	-284,832
סה"כ חיסכון [%]	-7.2%
סה"כ חיסכון למ"ר [₪/מ"ר]	-49.07

לסיכום, באמצעות שימוש במוצר בטון קל, כחומר מילוי לתשתית הריצוף, ניתן להגיע לחיסכון של כ-285,000 ₪ והפחתה של כ-71 טון CO2 בשלד של מבנה מגורים בן 10 קומות. ניתן להניח כי ככל שהמבנה גבוה יותר אחוז החיסכון יגדל בעקבות הפחתת הכוחות האופקיים.

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]
-7.06%	-148	2,097	1,949	סה"כ קו"ב בטון מבנה עליון [מ"ק] *
-6.92%	-15	218	203	סה"כ פלדה אומדן מבנה עליון [טון]**
-19.42%	-1,443	7,426	5,984	משקל מבנה (ריאקציות SLS) [טון]
-7.16%	-284,832	3,978,826	3,771,280	עלות שלד אומדן [₪]**
-7.22%	-71,476	990,290.0	918,814.0	פליטות פחמן [kgCO2e] ***

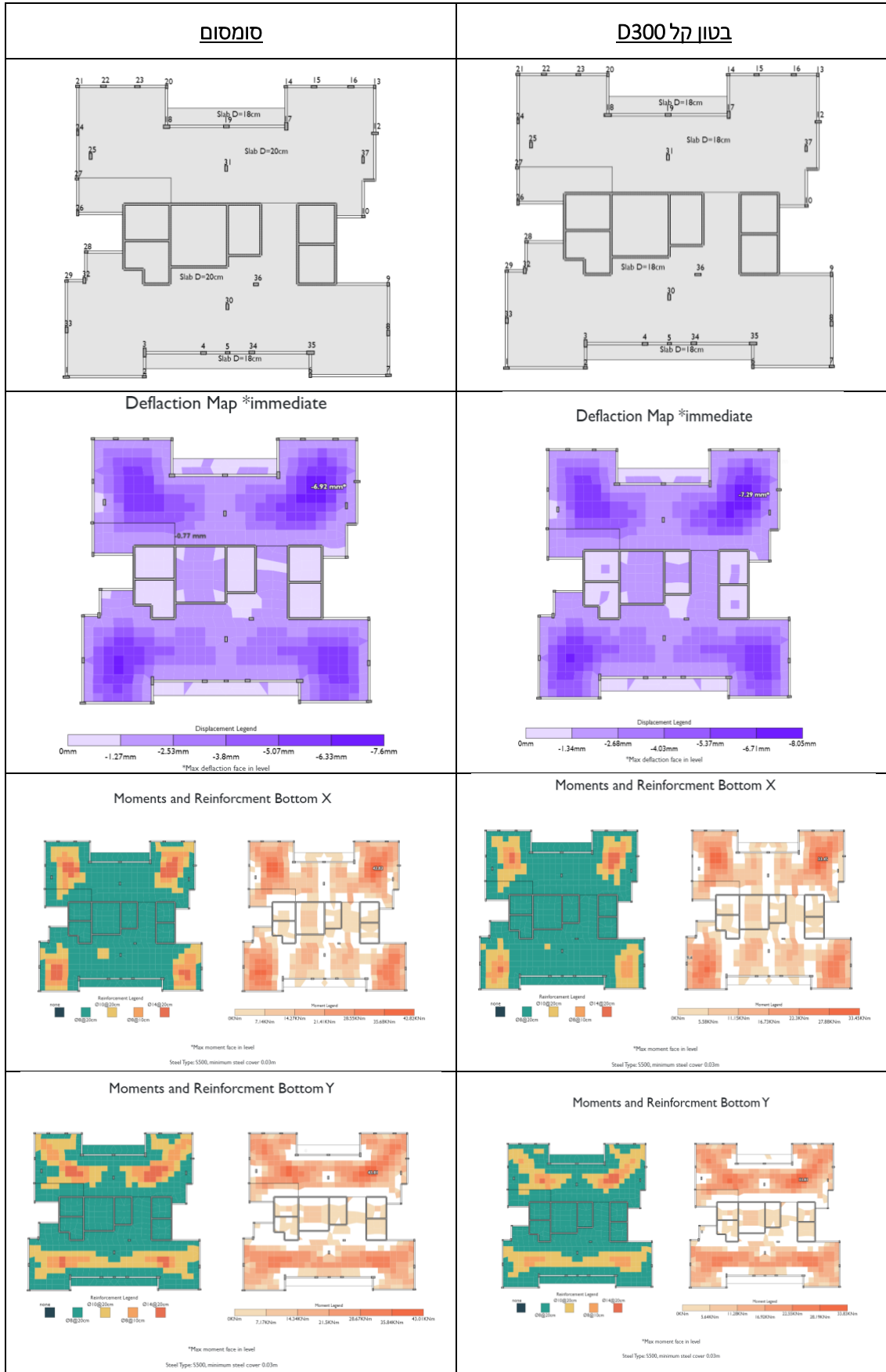
* סה"כ מ"ק בטון כולל חישוב חתכים של תקרות, קורות, עמודים וקירות, ואומדן כמותי לחישוב יסודות.

** עלויות לפי מחירון דקל 3/2017. כמויות פלדה לפי אומדן.

*** מקדמי פליטות נלקחו מ: Engineers The institue of Structural

אומדן חיסכון ביסודות

685	עלות ממוצעת של השלד למ"ר [₪/מ"ר]
10%	עלות ביסוס המבנה מסך עלות השלד
5,805	שטח המבנה [מ"ר]
-19%	ריאקציות [ק"ג]
-77,286	חיסכון מוערך ביסודות [₪]



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

ניתוח תרומת הבטון הסופר קל לבידוד התרמי של המבנה

בחלק זה של הדוח מובאת התייחסות לתרומתו של הבטון הסופר קל בהיבט התרמי, נראה את המקרים בהם הבטון הסופר קל 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

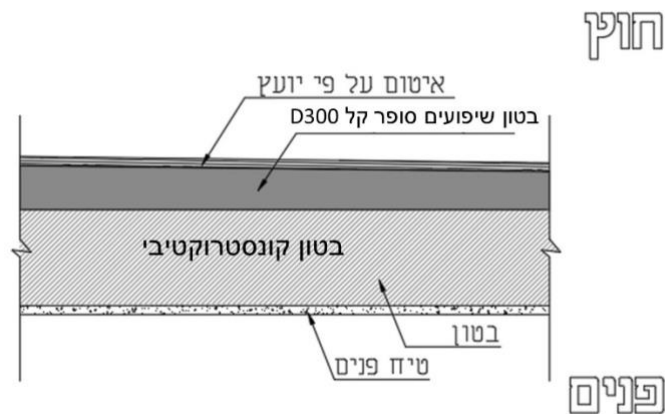
להלן הערכים התרמיים של הבטון הסופר קל בצפיפויות השונות שנמצאו בבדיקות מעבדת מכון התקנים הישראלי שבדקה את מדגמי הבטון הסופר קל (הבדיקה מובאת בנספחים).*:

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

תפקוד בטון סופרקל כבידוד גג באזור אקלימי ב':

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

להלן חתך גג טיפוסי עם בטון שיפועים סופר קל:



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]	λ [Watt/(m ² *K ²)]	ρ [Kg/m ³]	W [Kg/m ²]	r [(m ² *K ²)/Watt]
בטון סופר קל D 300		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
סה"כ עובי קיר		34.0				
התנגדות תרמית אופיינית כללית - r		דרישת 1045	התנגדות תרמית פניית	R	הולכה (U)	מסה סגולית
1.62		1.50	0.14	1.76	0.57	258

תפקוד בטון סופרקל 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 סופר קל כמצע לריצוף במקום חצץ "סומסום", הבטון הסופר קל 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 סופר קל בעובי 4 ס"מ בלבד, מספקת התנגדות תרמית של $R=0.52$ העונה על הנדרש בתקן (מינימום $R=0.5$) לרצפת חלל מחומם באיזור 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]	λ [Watt/(m ² *K ²)]	ρ [Kg/m ³]	W [Kg/m ²]	r [(m ² *K ²)/Watt]
בטון סופר קל D 400		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
סה"כ עובי קיר		26.0				
התנגדות תרמית אופיינית כללית - r		דרישת 1045	התנגדות תרמית פניית	R	הולכה (U)	מסה סגולית
0.52		0.50	0.34	0.86	1.16	274

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

תפקוד בטון סופרקל כבידוד רצפה מעל חלל פתוח:

גם במקרה זה, ניתן לראות שבטון סופר קל D400 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]	λ [Watt/(m ² *K ²)]	ρ [Kg/m ³]	W [Kg/m ²]	r [(m ² *K ²)/Watt]	
בטון סופר קל D 400	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	
סה"כ עובי קיר	29.0					
התנגדות תרמית אופיינית כללית - r	0.75	0.21	1.03	0.97	0.82	
זרישת	1045	התנגדות תרמית פנית	R	הולכה (U)	מסה סגולית	
0.75	0.21	1.03	0.97	286		

תפקוד בטון סופרקל כבידוד 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 סופר קל, ביישום עובי מינימלי של 5 ס"מ, הבטון הסופר קל מספק את הבידוד התרמי הנדרש ונחסך הצורך ליישום רצועת בידוד ברצפה הדירה לאורך הקיר החיצוני. הערה: הבטון הסופר קל אינו מייתר 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 הסופר-קל 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 הסופר קל חוסך את הצורך בשימוש בפוליסטירן ובכך חוסך כ-36,000 ש"ח של עלות יישום הפוליסטירן ברצפות ובגג המבנה.