

הסבת בניין משרדים לבית חולים תוך שימוש בסיבי פחמן לצורך חיזוק תקרת לוח"ד

במסגרת הסבת מבנה משרדים למרכז רפואי התעורר צורך להגדיל את עומסי השירות כך שיתאימו לשימוש החדש ואף לפתוח פתחים בתקרות הקומות השונות כדי להעביר בהן תשתיות הנדרשות לפעילותו של בית חולים. פתיחת הפתחים באמצעות ניסור, כמו גם הגדלת עומס השירות הצפוי, הצריכו חיזוק מקדים של התקרות שנבנו באמצעות לוח"דים, מה שייצר אתגרים לקבלן המבצע

שרון אלבז*



הפרויקט: ב"ח נארא-מדיקה

רשת בתי החולים הפרטיים נארא-מדיקה בחרה להסב בניין משרדים ברמת החייל שבתל אביב למרכז רפואי. משמעות ההחלטה היא, בין השאר, להסב חדרים משרדיים קיימים לחדרי ניתוח וטיפול מסוגים שונים. כדי לענות על הדרישות הרפואיות היה צורך להתאים את הבניין כך שתהיה אפשרות להעביר בו סדרה ארוכה של מערכות חדשות, כמו סניטריה, גזים וכדומה בין הקומות השונות במבנה. נוסף על כך, אופי השימוש השוטף בבית חולים שונה מאופי של שימוש משרדי, עקב הצורך בהכנסת ציוד רפואי כבד לחדרים או שינועו בין חדרים. שינוי הייעוד הביא איתו אתגרים הנדסיים.

המטרה: הגדלת העומסים המרביים של תקרות המבנה

הסבת בניין המשרדים לבית חולים פעיל הביאה עימה כמה אתגרים: למבנה תקרות אשר עשויות מלוחות טרומיים דרוכים (לוח"דים), המתאימים לסוג מבנה ולמפתחים אשר תוכננו במקור ואשר יכולת השינויים שבהם כמו הגדלת עומסים או הוספת פתחים וכו' מוגבלת.

הלוח"דים מגיעים כפלטות טרומיות בעלות רוחב קבוע (120 ס"מ בדרך כלל) ואורכים משתנים, בהתאם לדרישות המבנה בעת תכנונו.

לשימוש בלוח"דים שני יתרונות מרכזיים: 1. **יעילות:** הלוח"דים מיוצרים במפעל תחת בקרת איכות גבוהה, ומגיעים אל אתר הבנייה מוכנים לשימוש. כך, מתאפשר יישום מהיר

הפתרון שנבחר: חיזוק באמצעות סיבי פחמן

כדי לחזק מבנה, לעיתים אפשר לנקוט שיטה של הוספת קורות פלדה או עיבוי בבטון. אולם, במקרים רבים המהנדס ושאר אנשי המקצוע שסביבו אינם יכולים להיעזר בפתרונות ה"מסורתיים" הללו, כיוון שהמציאות בפרויקט מורכבת יותר, כפי שהדגמנו לעיל במיזם הסבת מבנה משרדים למבנה רפואי. במקרים כאלה, וברבים נוספים, מתאים פתרון הנדסי גמיש ורב היכולת של חיזוק באמצעות יריעות סיבי פחמן (CFRP). **חברת בנין הארץ**, נבחרה כקבלן מבצע לחיזוק המבנה באמצעות סיבי פחמן.

סיבי הפחמן מוכרים בעולם משימוש בתעשיות התעופה, מכוניות ואופני מרוץ ובשנים האחרונות נעשה בהם שימוש מסיבי בהנדסה אזרחית בעיקר לצורך חיזוק מבנים, כיוון שיריעות או רצועות סיבי פחמן הן דקות ביותר מצד אחד, אך מסוגלות לייצר כושר עמידה בעומסים גדולים יחסית מצד שני. כדי להתאים את העומס הנדרש לכמות סיבי הפחמן הנדרשת, המהנדס בוחר את מספר השכבות הנדרש ואת תוואי החיזוק וההדבקה של יריעות הפחמן כדי ליצור עמידה בעומסים המבוקשים, כולל מקדמי בטיחות.

בחינת הפתרון שנבחר במיזם הנוכחי

כדי לבדוק את ישימות הפתרון של סיבי פחמן לצורך חיזוק לוח"ד במבנה המדובר, יש לבצע חישוב סטטי שבוחן עמידה בעומסים לאור התקינה הישראלית והבינלאומית: הן עומס שימושי (העומס שעבורו תוכנן המבנה – אנשים, ציוד וכדומה), והן עומס במצב המוגדר בתקינה הישראלית כ"מצב גבולי של הרס" (ת"י 412).

בחינת העומסים האמורה בוצעה בידי **אינג' אהרון רביץ** ממשרד המהנדסים **"א. רביץ מהנדסים"**, המתמחה בחיזוקים מסוג זה, אשר בדק לעומק את ישימות הפתרון של שימוש בסיבי פחמן לחיזוק לוח"דים.

הבדיקות שבוצעו הותאמו לתקנים הישראליים הרלוונטיים (בעיקר תקן 466 על חלקיו השונים) כמו גם לתקן האמריקאי לחיזוק באמצעות CFRP – ACI-440.2R-08. בין השאר, בוצעו בדיקת

מתעורר צורך לפתיחת מעברים אנכיים בין קומות הוא הוספת פרופילי פלדה בתחתית הלוח"דים בניצב לכיוונם הראשי. כך, העומסים מועברים מהלוח"ד המוחלש אל פלטות שכנות ובריאות יותר. אופן חיזוק מסוג זה גורם להחלשה, לעיתים קריטית, בלוח"דים ה"בריאים" אשר כעת מקבלים עומסים נוספים שלא תוכננו במקור עקב הסכמה הסטטית החדשה. כמו כן, הוספת פרופילי פלדה בתחתית התקרות יוצרת שינוי ופגיעה באופי האדריכלי של המבנה. נוסף על כך, בבית החולים נארא-מדיקה משמעות העיבוי בקורות פלדה או בתוספת בטון הייתה להנמיך את התקרות, והנמכה שכזו עומדת בסתירה לתקנים המשפיעים על גובה התקרה בחדרי ניתוח. כך, למשל, קובע משרד הבריאות בישראל כי בחדר ניתוח שבו מתבצעת פעולה כירורגית בינונית, יש לוודא כי "גובה החדר מאפשר התקנת מערכת מיזוג אוויר עם החלפת אוויר, וסינון בתנאי יתר לחץ" וכי על התקרה להיות "תקרה אקוסטית" ייחודית. במילים אחרות, התנאים הבסיסיים במבנה שיועד לחיזוק לא אפשרו את הנמכת התקרה ונוצר צורך למצוא פתרון לחיזוק שלא יבוא על חשבון גובה התקרה. נוסף לכול, בפרויקט מסוג זה, כמו כמעט בכל פרויקט מסחרי, כל האטה ועיכוב בעבודה הם הפסד של פעילות מסחרית ועל כן המטרה היא שפרויקט כזה יתבצע במהירות רבה ככל האפשר, ועם מינימום הפרעות לעבודות נוספות שמתבצעות במבנה.

ומדויק בשטח תוך שימוש בכוח עבודה קטן יחסית. 2. **יישום במפתחים גדולים:** שימוש בלוח"דים מאפשר יישום תקרות במפתחים גדולים ובעיבוי קטן יחסית בהשוואה לשיטות ביצוע אחרות.

מנגד, לשימוש בלוח"דים גם חיסרון: חוסר גמישות בביצוע שינויים לאחר הייצור. הלוח"דים מתוכננים במדויק לעמוד בעומסים שאליהם תוכנן המבנה מלכתחילה, ולא להגדלת עומסים. נוסף על כך, מאחר שרוחבם של הלוח"דים קבוע ושכיוון נשיאת התקרות הוא אחד, קיימת בעיה הנדסית לבצע בהם שינויים במקרה שבו נוצר צורך לשנות את אופייה ותפקודה של התקרה.

במסגרת הסבת המבנה לבית חולים, התעורר צורך להתאים את עומסי השירות במבנה לזה של בית חולים. נוסף על כך, התעורר צורך להעביר מערכות חדשות של תשתיות בין קומות במבנה, וליצור מעברים אנכיים בין הקומות על ידי ביצוע ניסור בתקרה. ניסור הבטון מחליש את התקרה, כמו גם חיתוך כבלי הדריכה אשר מקטין את יכולת העמידות של התקרה לעומסים שתוכננו בעבר וכל שכן לצרכים החדשים, במיוחד נוכח השימוש בלוח"דים במבנה המקורי.

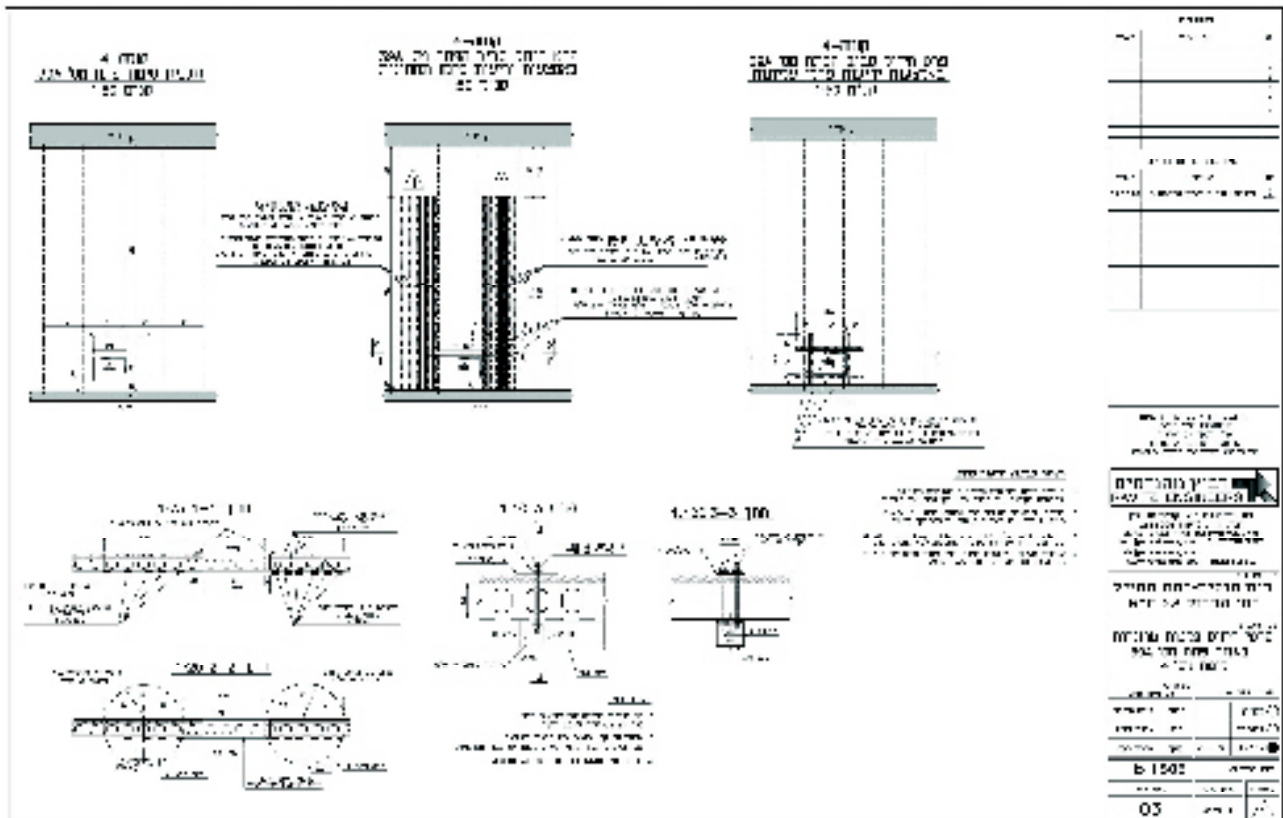
כדי לבצע את פתיחת הפתחים האמורה בין הקומות, התעורר צורך לחזק, קודם לניסור, את התקרות.

האתגרים בחיזוק מבנה במסגרת הסבתו לבית חולים

האופן המסורתי לחיזוק תקרה במקרה שבו



חיזוק פלטות טרומיות קודם הניסור באמצעות רצועות למינט



תכנית ופרטי חיזוק פלטות טרומיות - בית החולים נארא

ולהלן פירוט החישובים והשלבים שהובילו לתכנון:

- ראשית עלינו למצוא את העיבור בתחתית הלוח"ד על מנת ליצור "מצב 0" – ebi- מציאת העיבור המותר ל- FRP- efd- בדיקת תסבולת של הלוח"ד למצב גבולי של הרס
1. הנחת פירוס עיבורים למצב גבולי של הרס כאשר הבטון בכשל (ecu) ו- FRP בכשל (ebi+efd)
 2. מציאת "בלוק המאמצים" בבטון, המאמצים והכוחות בכבלים ובריעות.
 3. מציאת שיווי משקל אם הכשל הוא ב- FRP (C<T) מתקנים את פירוס העיבורים כך שהעיבור בתחתית נשאר, אך הבטון אינו מגיע לכשל (השוואת כוח הלחיצה לכוח המתיחה ומציאת גובה האזור הלחוצי) מוצאים מחדש את הכוחות עד לשיווי משקל.
 4. מציאת שיווי משקל אם הכשל הוא בבטון (T>C) מתקנים את פירוס העיבורים איטרטיבית (ע"י הקטנת העיבור של ה- FRP וכתוצאה מזה גם של הפלדה) עד למציאת שיווי משקל.
 5. אם הכשל הוא בבטון ייתכן וניתן לשים פחות – FRP (יש לבדוק זאת)

שלב א' - תוכנית חיזוק מפורטת

כעבודה מקדימה, תיעדו אנשי חברת **בנין הארץ** את כל סימוני הפתחים המבוקשים בתקרות, עם מיקומם, גודלם ומיקומי הכבלים המדויקים בלוח"דים. תהליך התייעוד נעשה תוך השוואה מדויקת בין המצב בשטח לבין תוכניות המבנה ודרישות הניסורים. במקום שבו כבלים של הלוח"ד צפויים להיפגע עקב הניסור, חושב כמה כבלים ייפגעו והיכן – ומה המשמעות מבחינת חוזק המבנה.

על פי התייעוד שנעשה נבנתה תוכנית חיזוק מפורטת במיוחד בכל נקודה במבנה שבה אמור להתבצע ניסור. התוכנית כללה את אורך ומספר היריעות וכן את מיקומם המדויק של מסלולי ההדבקה (תוכנית פתח-הפנייה).

תוכנית החיזוק הוכנה על מנת לעמוד בתקן הישראלי של בטון דרוך ובהתאם לתקן האמריקאי של חיזוק חתכים מבטון דרוך על ידי FRP (ACI-440.2R-08) התוכנית לקחה בחשבון את הגדלת התסבולת להרס כמו גם את המאמצים המתקבלים בלוח"ד במצב שירות ועמידת החתך והחומרים השונים (בטון, פלדה, יריעות פחמן) בדרישות התקנים.

מאמצים בבטון הדרוך למצב גבולי של שירות ובדיקת תסבולת החתך למצב גבולי של הרס. נוסף על כך בוצעה בדיקה לוודא שהכוח בכבלים הנוותרים, שלא נחתכו, לא עולה על הכוח המותר.

בחינת העומסים הביאה למסקנה שסיבי פחמן שיישמו בשטח לפני ביצוע הרס (פתיחת פתח) יאפשרו למנוע את הפגיעה בתקרה.

החישובים הנדרשים העלו כי היישום של סיבי פחמן במקרה זה הוא פשוט, מהיר וזול יחסית – ועונה על כל הדרישות האדריכליות המוקפדות.

תהליך ביצוע העבודה

בניגוד לשיטה של חיזוק מבנים על ידי בטון או ברזל, שבה גם עבודה לא מדויקת מספקת חיזוק מסוים, הרי שחיזוק באמצעות סיבי פחמן מחייב דיוק מרבי במתודולוגיה סדורה. תהליך העבודה כולל, בין השאר: בחירה מדויקת של סוג סיבי הפחמן, המידות ואמצעי ההדבקה; מדידות בשטח – וסימול מדויק של מסלולי ההדבקה; יישור משטחי ההדבקה וניקויים מאבק; הדבקת סיבי הפחמן באופן מדויק – וללא יצירת בועיות; ביקורת הדבקה ותיקונים נדרשים.





החיזוק באופן אחיד ושווה הדבקת רצועות לחינט לפי תוואי תכנית

ההדבקה, האורך שלהן ומספר השכבות שהוצמדו למבנה. המהנדס שתכנן את תוכנית החיזוק הגיע לשטח ובחן בעצמו אם הכול בוצע לפי התוכנית שיצר.

שלב ד' - פתיחת הפתחים

לאחר אישור המהנדס כי החיזוק בוצע בהתאם לתוכניות, ניתן האישור לקדוח ולנסר פתחים בתקרה כדי להעביר בהם את התשתיות הנדרשות.

גורמים מרכזיים שלקחו חלק בפרויקט:
א. רביץ מהנדסים, מהנדס רוני רביץ
אנונו רפי הנדסת מבנים, מהנדס רפי אנונו
אלקטרה דנקו: מנהל פרויקט: יואב אריאלי, מנהל פרויקט: משה אלעד
ב. א. אייכנבאום ניהול ופיקוח, יאיר עין גדי
בנין הארץ, קבלן
 המיזם בוצע בחודשים יוני-יולי 2018.
 לקובץ חישובים סטטיים מלא ראה באתר בנין הארץ.

*** שרון אלבז, מנהל פרויקטים ראשי, בנין הארץ.** חברת בנין הארץ הנה חברה קבלנית רשומה המובילה בביצוע פרויקטים הנדסיים מורכבים: חיזוק מבנים בחומרים מרוכבים, חיזוק מבני פל-קל, יישום טכנולוגיית הזרקה, שימור ושיקום מבנים ועבודות קידוח מיוחדות.



קידוח וניסור בלוח דרוך לפתחי מעבר צנרות

את התאמת התוכניות למצב בשטח ובתקשורת עם מהנדס החברה. לאחר עדכונים והתאמות אחרונים של התוכנית, אפשר היה להתחיל את העבודה עצמה.

שלב ב' ו-ג' - הכנה בשטח והדבקת סיבי פחמן

ראשית סומנו מסלולי ההדבקה ומיקומי היריעות המדויקים על התקרה. לאחר מכן בוצעה עבודת הכנה בנקודות המיועדות להדבקה כדי לוודא הדבקה מקסימלית. סיבי פחמן לחיזוק מבנים יכולים להגיע במגוון צורות יישום, והמהנדס האחראי הוא זה שבחר את הסוג הרלוונטי לכל פרויקט בהתאם לממצאים בשטח. שתי צורות נפוצות ליישום סיבי פחמן לחיזוק הן "יריעות סיבי פחמן" ו"למינט". במקרה זה בחר המהנדס לעשות שימוש ברצועות למינט מסוג Sika CarboDur. 1214 רצועות אלה תואמות את העומס שיש להשיג בהתאם לחישובים הסטטיים. את הרצועות חתכו אנשי בניין הארץ במידות הנדרשות. במקומות מסוימים כללה תוכנית החיזוק הדבקת רצועות למינט נוספת להגדלת העומס הנדרש. עם סיום תהליך הדבקת הרצועות הקפדני, וכחלק מתהליך ביקורת תהליכית קפדני, נערכה מדידה נוספת (דבר שיכול להתבצע תוך כדי הייבוש), זאת כדי לדעת בדיוק מה בוצע, מהו מיקום הרצועות המדויק לאחר

6. מומנט התסבולות מחושב על פי כוח המתיחה כפול הזרוע המתאימה לו.

שלב ראשון - עיבורים

מציאת עיבור בתחתית הלוח"ד על מנת לייצר "מצב 0" ebi-

$$\sigma_{bc} = -\frac{T_{cc}}{A_p} - \frac{T_{cc} \cdot e_p}{W_{bp}} + \frac{M_{G+Q1}}{W_{bp}} + \frac{M_G}{W_{bc}}$$

$$\epsilon_{bi} = \frac{\sigma_{bc}}{E_p}$$

מציאת העיבור המותר ל-FRP-efd

$$\epsilon_{fa} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{f_c'}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \cdot \epsilon_{fu}$$

$$\epsilon_{fa} = 0.043 \sqrt{\frac{f_c'}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (10.1.1)$$

$$\epsilon_{fa} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c'}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \quad (S7)$$

שלב שני - כשל סימולטני

הנחת פירוס עיבורים למצב גבולי של הרס כאשר בטון בכשל (ecu) וה-FRP בכשל (ebi+efd).



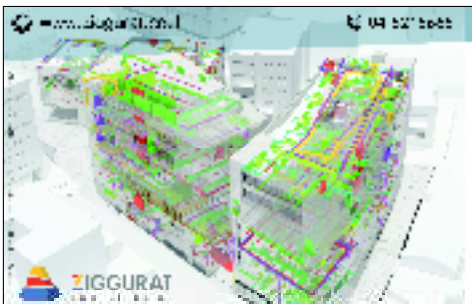
עיבור בפלדה

תוספות עיבור בפלדה. מכאן יש לנו את כל העיבורים הנחוצים וניתן לחשב את הכוחות. כעת יש לבדוק האם מתקיים שיווי משקל במידה והתשובה חיובית

$$M_{ed} < C \left[\sigma_s \left(d - \frac{x}{2} \right) + \sigma_{sc} \left(d - \frac{x}{2} \right) \right] + M_{FRP}$$

$$M_{ed} = T_s \cdot x_s + T_{sc} \cdot x_{sc}$$

במידה ולא - יש לבחון היכן מתרחש הכשל לפי פירוט השלבים בתכנון המפורט קודם סעיפים 3, 4. במידה והכשל הינו בבטון (T>C) מתקנים את פירוס העיבורים איטרטיבית על ידי הקטנת העיבור של ה-FRP וכתוצאה מזה גם של הפלדה, עד למציאת שיווי משקל. כחלק מתהליך ביקורת תהליכית, נערכה בדיקה חוזרת במקום, כדי לוודא



דגורט תיאום מערכות וניהול BIM

מדוע רק דגורט?

- ✓ יחידה עם 15 שנות ניסיון בניהול BIM
- ✓ ריביל ל-10,000,000 ש"ח מותקנים. הארץ וביניהן דגורט ורמטל
- ✓ יחידה עם תוכנה המציעה את המערכת המובנית על ידי דגורט

ZIGGURAT