



צילום 1 (הדמיה): מבנה ה"טרימרן" בפראג לאחר השלמתו

כך נבנה הפרויקט הייחודי של מרכז הכנסים והמסחר "טרימרן" בפראג

4 תקרות תלויות מעל מבנה קיים

ולדימיר ג'נטה, ז'אן וצ'סלאק ודליבור גרגור, מהנדסי חברת "אקסקון"

רסטילאב מאז'אץ', מהנדס חברת "רקוק"

Vladimír Janata, Jan Včelák, Dalibor Gregor, EXCON, a.s. Rostislav Mazáč, RECOC, spol. s r.o.

עריכה והבאה לדפוס בעברית: ד"ר אדי ליבוביץ, מהנדס משה זילכה M.Sc

מבוא

מאמר זה עוסק בתכנון, בייצור ובהקמה של מבנה פלדה דרוך עילי המשמש להקמה של מבנה מסחרי ומרכז קונגרסים בשם "טרימרן" הממוקם בפראג, צ'כיה, שהקמתו הושלמה בשנת 2017 המוצג בצילום 1. האתגר ההנדסי הייחודי בפרוייקט זה היה הצורך בתלייה של ארבע תקרות מעל מבנה קיים בן ארבע קומות

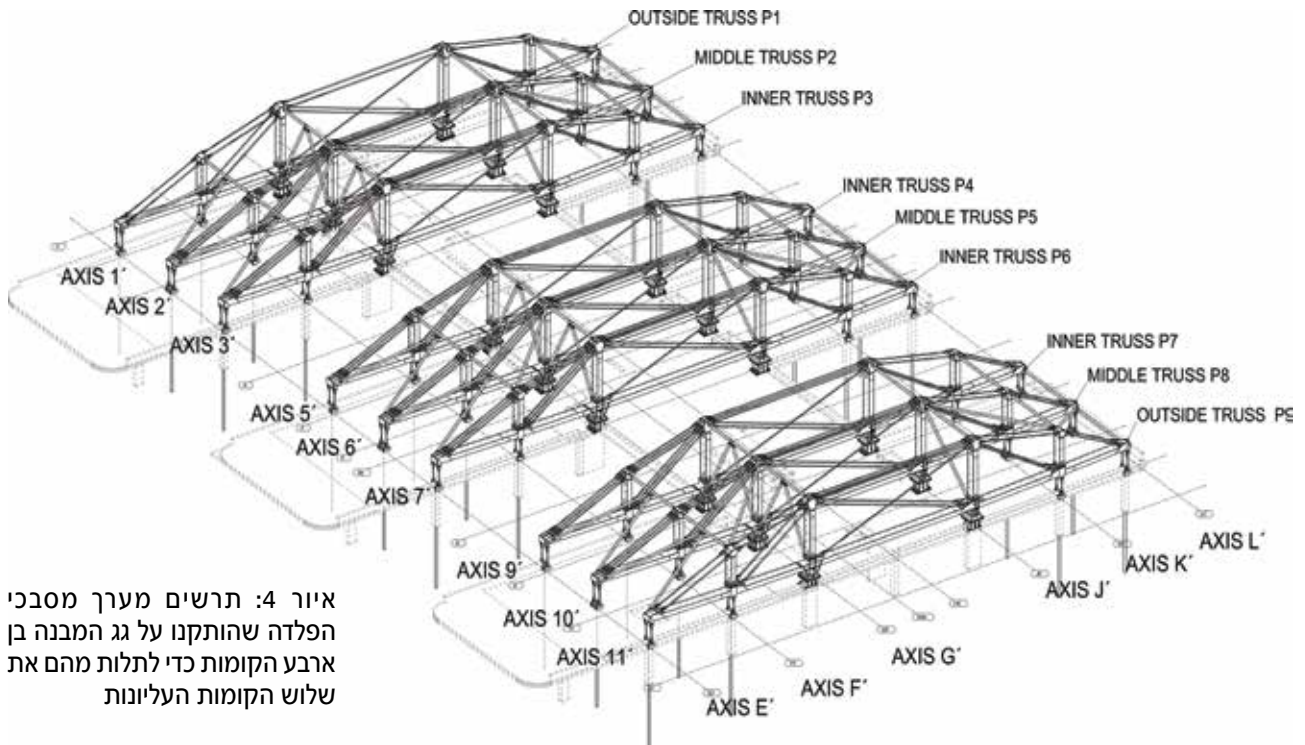


צילום 3: מערך עמודי וקורות הפלדה הזמניים התומכים את התקרה ועמודי המבנה העילי. עמודי פלדה אלה הוסרו לאחר גמר ביצוע מסבכי הפלדה והעברת העומסים מעמודי התמיכה הזמניים למסבכים

באמצעות מסבך פלדה דרוך ואיזון המומנט באמצעות תלייה של תקרות המבנה, תוך יצירת חלל פנימי פתוח במפתחים גדולים. תליית הקומות נעשתה על-ידי התקנה של תשעה מסבכי פלדה דרוכים, התומכים מצד אחד את קצה התקרות של החלק הזוי כמתואר בצילום 2, ומצד שני את התקרות שמעל אולם הכנסים הגדול שנמצא בשלוש הקומות הבנויות שמעל קומת הקרקע, המוצג בבנייתו בצילום 3 - כולל את תקרת האולם עצמו. מבנה



צילום 2: חזית מבנה ה"טרימרן" במהלך הביצוע: תליית התקרות מעל ארבע הקומות התחתונות בצד שמאל ומערך מסבכי הפלדה על גג המבנה



איור 4: תרשים מערך מסבכי הפלדה שהותקנו על גג המבנה בן ארבע הקומות כדי לתלות מהם את שלוש הקומות העליונות



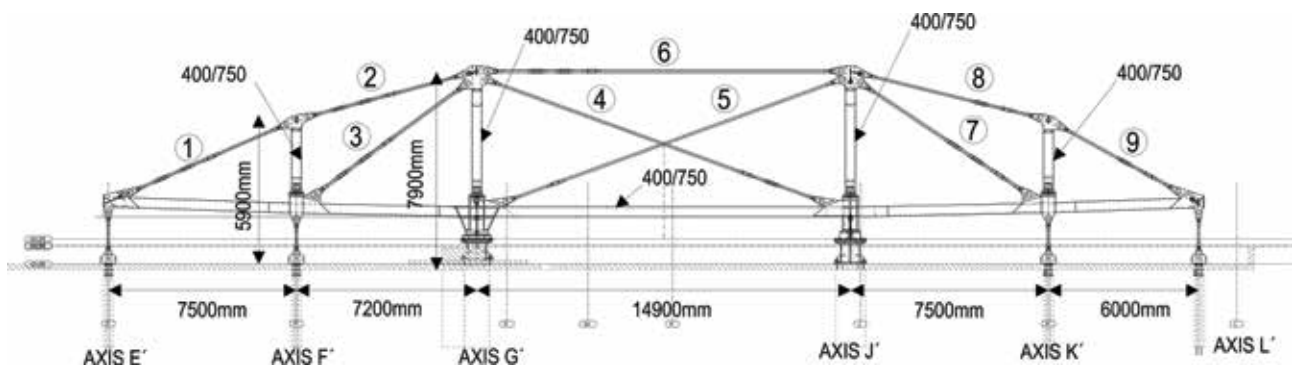
צילום 5: פרט השענה פרקי נייד שעליו ועל פרחים נוספים הותקן מסבך הפלדה

בגמר יציקת התקרה העליונה של הקומה הרביעית, שהיא תקרת אולם הכנסים, הותקן מערך של תשעה מסבכי פלדה דרוכים, שתוכננו ובוצעו כקורה על שני סמכים פרקיים שהותקנו על עמודי המבנה, הנמשכים עד היסודות כמפורט באיור 4. פרט הסמך הפרקי הנייד שבוצע בציר J מוצג בצילום 5.

הפלדה העילי שהותקן על גג המבנה כולל 582 טון של מסגרות פלדה ו-257 מותחנים מתוצרת חברת Macalloy הבריטית, הדרוכים בדריכת-קדם במשקל כולל של 122 טון.

תיאור המבנה, הפיתרון ההנדסי והמערכת המבנית

המבנה בנוי מארבע קומות מרתף תת קרקעיות ושבע קומות נוספות מעל לקרקע. עד לקומתו השנייה נבנה המבנה באופן קונבנציונלי-קומת קרקע שמכילה מבואה גדולה ומעליה שלוש קומות. במפלס הקומה השנייה תוכנן אולם כנסים בעל מפתחים גדולים המתנשא לגובה שלוש קומות, עד לקומה הרביעית של המבנה. לצורך ביצוע המבנה באופן רגיל מוקמו 17 עמודי תמיכות פלדה זמניים כמותואר בצילום 3. מערכת תמיכה זו היוותה תחליף לעמודים ואפשרה את המשך בניית הבניין בין צירים עד לתקרת הקומה השביעית העליונה ללא מגבלות. תכנית הבניין החל מהקומה השלישית ועד לקומה השביעית משתנה ונראית כמו צורת האות "E". כלומר, שלוש קומות אלה מורכבות משלושה מבנים נפרדים המחוברים ביניהם.



איור 6: תרשים אחד ממסבכי הפלדה הנושאים את הקומות התלויות, הסמכים ונקודות תליית הקומות

ניצב למישור על מנת לפזר את כוחות הרוח הפועלים בניצב למישור המסבך כמתואר בצילום 7.

מעל למבנה הקיים, הנקרא EMPIRIA, ולאורך צירים 'K', 'L' נתלו מעל לכל אחת משלוש הקבוצות של המסבכים שלוש קומות של מסגרות בטון מזויין, המחוברות במפלסי התקרות לחלק המרכזי של הבניין בחיבור פרקי. עקב מגבלות גישה וביצוע התאפשרה גישה לתחתית מסגרות הבטון רק מגג המבנה הקיים. לפיכך בוצע מערך של קורות פלדה מצולבות שנתלה על גבי מסבכי הגג. לתוך מערך קורות זה הוכנסו פאנלים טרומיים מבטון דרוך. תיאור מערך התלייה של קורות הפלדה מוצג בצילום 8.

בצורה זו הובטח הביצוע של התקרה הראשונה, כך שניתן היה לבצע את התקרות הנוספות באופן קונבנציונלי. בשלב הבא נתלה מבנה הבטון, שנתמך על-ידי מבנה פלדה זמני לאורך צירים 'E', 'F'



צילום 7: מערך מוטות הדריכה והאלכסונים להבטחת היציבות הצרית של המסבך

תיאור מערך המסבכים ומערכת המוטות הדרוכים

תיאור מסבך התלייה מוצג באיור 6. באיור זה ניתן לראות כי החגורה התחתונה המהווה מוט לחץ בנוייה מקורת פחים בחתך מלבני 400X750 מ"מ ובעלת ארבעה עמודים בגובה שבין 3.2 ל-5.2 מ', וכוללת צמדים או שלשות של מותחנים דרוכים מתוצרת חברת Macalloy עשויים מפלדה בדרגת חוזק 520 מגפ"ס ובחתך עגול בקטרים M76, M90, M100. מוטות אלה משמשים כחגורה עליינה והאלכסונים של מסבך הפלדה. חגורת המסבך התחתונה יוצרה בצורה קמורה (קצוות החגורה נוטים מעלה) וזאת כדי להבטיח את יציבות המסבך כנגד קריסה מחוץ למישור המסבך. לבסוף חוברו המסבכים ביניהם באמצעות רכיבי הקשחה בכיוון



צילום 9: חיבור עמוד הבטון הדרוך אנכית למסבך הפלדה



צילום 8: צילום אווירי של מערך המסבכים בגמר התקנתם ותחילת העבודות של בניית הקומות



צילום 11: התקנת מסבכי הפלדה על גבי גג המבנה הקיים



צילום 12: ביצוע השלמת מוטות המסבך ודריכתם באתר

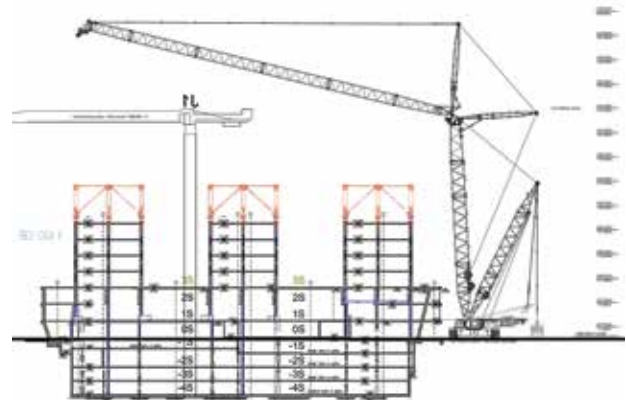


צילום 13: מהלך ביצוע הדריכה של המותחנים במוטות המסבך

תחילה דריכה ראשונית של מותחנים מספר 1 ו-3 להשגת כוח של כ-350kN ובכדי למנוע הבדלי כוחות בצמדים ובשלשות המותחנים. דריכה אחרונה בוצעה לאחר השלמת מסגרות הבטון לאורך צירים 'K'-L, כאשר המטרה העיקרית הייתה לשחרר את המבנה לאורך צירים 'E'-F מהתמיכות הזמניות ולהגביה את המבנה ששקע בכ-60 מ"מ לאורך צירים 'K'-L. במהלך היציקות של יתר המבנה. רדיסטריביוציה רצויה של הכוחות הפנימיים במסגרות הבטון ופיזור כוחות אופטימלי ממותחנים הושג אודות לדריכת הקדם. מותחנים מספר 4 לאורך צירים 3, 5, 7 ו-9 שוחררו תחילה לכ-50kN כדי לשמור על רזרבות הכוח עבור הכוחות המקסימליים המתפתחים בכל המותחנים לאחר דריכת הקדם הסופית. לאחר מכן מותחנים מספר 1 ו-3 נדרכו (למקסימום של 1,800kN) בשלב אחד או בשני שלבים באמצעות מותחן הידראולי (צילום 13).

באמצעות המותחנים הדרוכים של המסבך. תליית מבני הבטון נעשתה משני צידי המסבך באמצעות צמדים של מוטות M85 של חברת Macalloy המעוגנים באמצעות מערכת "מזלג" ותיבה של פלטות פלדה לעמודי הבטון הדרוכים כמוצג בצילום 9.

עמודי הבטון בתוך המבנים התלויים נדרכו אנכית על-ידי מערכת כבלי דריכה העוברים דרך העמודים, כאשר עוגן אחד מחובר לתקרת אולם הכנסים (התקרה תלויה על עוגן זה) ועוגן שני הממוקם במערכת הפלטות שבגג. דריכת הקדם בעמודי הבטון מונעת את היווצרותם של כוחות המתיחה בשלב פירוק התמיכות הזמניות ובכך מונעת את סדיקתם. התזוזה החופשית המשותפת של מבנה הבטון ומסבכי הפלדה הנובעת משינויי טמפרטורה ושינויי עומסים נמנעת באמצעות מותחנים פרקיים מסוג M85. הכוחות האנכיים הפועלים משני צידי הזיז של מסבך הפלדה הינם 44,000kN לאורך הצירים 'E'-F, ולאורך הצירים 'K'-L. כוחות מתיחה אלה מועברים באמצעות המותחנים העליונים שבמסבך הפלדה הדרוך. הפרש הכוחות האנכיים בין שני צידי המסבך מאוזן באמצעות אלכסוני ההקשחה המרכזיים ומותחנים מספר 4 ו-5.



תרשים סכמתי של ביצוע ההתקנה ומיקום המנוף יחסית לקירות המרתף

ה"צור וההקמה של מבנה הפלדה הדרוך

כל המותחנים הורכבו מראש על גבי גג המבנה, ועליהם הותקנו מדי עיבורים שחוברו למערכת קליטה ועיבוד נתונים. בצורה זו ניתן היה לעקוב אחר מהלך ביצוע הדריכה של מוטות המתיחה, ובעתיד אפשר יהיה לבחון ולנטר את המאמצים הקיימים במוטות אלה ואת השינויים שחלים בהם במהלך תקופת השימוש במבנה. חגורת המסבך התחתונה שהורכבה מפלטות פלדה מרותכות בחוזק S460 הועברה לאתר והונפה בשלמותה באמצעות עגורן נייד כמתואר באיור 10. חשוב לציין כי עגורן זה הוא הגדול מסוגו בצ"ה וכל נושא הצבתו והשפעת מיקומו על העומסים המופעלים על קירות המרתף הסמוך נלקחו בחשבון בזמן ההנפוט. החגורה התחתונה הונחה בצורה הפוכה על גבי המבנה. לאחר חיבור החגורה התחתונה לשני העמודים העשויים מפלטות פלדה מרותכות מסוג S355, והרכבת מותחנים מספר 5, 7, 8 ו-9, הונף המסבך בשנית כמתואר בצילום 11 וסובב ב-180 מעלות למיקומו הסופי. בשלב זה הורכבו כל העמודים והמותחנים הנותרים כמתואר בצילום 12.

כאשר שתי הקומות לאורכם של צירים 'K'-L הושלמו, בוצעה



צילום 14: מראה פנורמי של אולם הכנסים בגובה שלוש קומות בבניין ה"טרימרן", שמעליו תלויות שלוש קומות נוספות

תוך התחשבות והכנה של שלבי הביניים השונים והודות לשיתוף פעולה מלא של כל הגורמים המעורבים בתכנון, בייצור וביצוע הפרויקט. הקונספט של מסגרות בטון התלויות ממבנה פלדה איפשר בנייה מעל מבנה קיים וכן ביצוע של אולם קונגרסים במפתחים גדולים ללא עמודים ובתקרות בעובי סביר. מראה אולם הכנסים בקומות 2-4 של המבנה לאחר הסרת קונסטרוקציית הפלדה התומכת, תוך העברת העומסים בתלייה למסבכי הפלדה שהותקנו על הגג, מוצג בצילום 14.

פרוייקט זה הינו ייחודי גם מבחינה זו שהוא הראשון מסוגו המבוצע בצ'כיה. הניסיון שנצבר בפרוייקט זה ישמש בפרוייקטים עתידיים של מבני בטון עם דריכת קדם של פלדה מרוכבת.

הפרוייקט מומן על-ידי S+B Plan und Bau Prag spol s.r.o בהתאם לתכנון האדריכלי של האדריכל Ernst Hoffman ולפרטי התכנון של אדריכל Vaclav Aulicky מחברת האדריכלות Spojprojekt Praha, a.s. האנליזה הסטטית הגלובלית והתכנון של מבנה הבטון בוצעו על-ידי Rostislav Mazac מ-RECOC, s.r.o. תכנון מבנה הפלדה, תכנון דריכת הקדם כולל הפיקוח על ההקמה נעשו על-ידי המהנדסים Jan Vcelak ו-Vladimir Janata ותכניות הייצור בוצעו על-ידי Dalibor Gregor מ-EXCON, a.s. Metrostav, a.s ייצרו והקימו את המבנה עבור הקבלן הכללי PP53 s.r.o. מותחני Macalloy נשלחו, הוקמו ונדרכו על-ידי עובדי חברת Tension Systems, s.r.o, ומדי העיווי והמדידות בוצעו על-ידי Michael Necas מ-EXCON, a.s.

במהלך פעולה זו מותחנים מספר 5 שוחררו בשל השפעתה של הדריכה במותחנים מספר 1, 3 ונדרכו שוב. לבסוף נדרכו מעט חלק מהמותחנים מספר 7 ו-9 וזאת בכדי לתקן אי דיוקים עדיניים בגיאומטריה לאורך צירים 'E-F'. הכוחות במותחנים נמדדו באמצעות מדי עיבורים תוך שימוש בבקרה ממוחשבת המאפשרת מדידה של 80 מותחנים בו-זמנית. מדידות עיווי ותדירות העומסים במותחנים בוצעו לאחר סיום הקמת המבנה ופעם נוספת בתום שנה מהשלמתו.

מודלים לאנליזה סטטית הליך דריכת הקדם

לצורך האנליזה הגלובלית של המבנה בוצע מודל הכולל את כל האלמנטים של מבנה הפלדה, המותחנים ומבנה הבטון שמודל על-ידי אלמנטי קליפה (shell elements). מודל זה שימש לתכנון של מסגרות הבטון וכבלי הדריכה. מודל פשטני יותר, הכולל תחליף של מסגרת פלדה הנשענת על סמכים אלסטיים עם מאפיינים זהים למבנה הבטון שימש לתכנונו של מבנה הפלדה. לצורך ניתוח המבנה נלקחו בחשבון 33 שלבי בנייה שונים הכוללים מודלים סטטיים משתנים בהתאם להתקדמות הבנייה ושלבי ההעמסה של מסבכי הפלדה עם תוספות העומס ממבנה הבטון. הליך דריכת הקדם חושב תיאורטית עבור כל אחד משלושת המסבכים באופן נפרד וזאת, באמצעות יישום מכוון המבוסס על מטריצות ההשפעה ההדדית של זוגות או שלשות המותחנים הבודדים בכל אחד משלושת המסבכים.

סיכום

פרוייקט מקורי וייחודי זה הוגשם אודות לתכנון וביצוע קפדניים,