

הנדסת בנייה ותשתיות

כתב העת המקצועי של איגוד המהנדסים לבנייה ולתשתיות בישראל

גיליון 72

יוני 2017



בהוצאת

חירה
הוצאה לאור בע"מ

לשכת המהנדסים
האדריכלים והאקדמאים
במקצועות הטכנולוגיים
בישראל

HEAi

איגוד המהנדסים
לבנייה ותשתיות בישראל

האחים המהנדסים חיים ויחיאל שטיינברג על תכנון הנדסי מסובך ויוצא דופן

הקונסטרוקציה של היכל הזיכרון הלאומי



היכל הזיכרון הלאומי במבט מבית הקברות הצבאי בהר הרצל בירושלים. משמאל נראית הכניסה לבית העלמין

את אתר ההנצחה בהר איתן, ליד מבשרת ציון, שהוא חלק מיער סטף, אולם התוכנית נגזזה לאחר שהארגונים הירוקים זכו בתביעה משפטית שהגישו נגדה בגין פגיעה בנוף וביער ירושלים. כתוצאה מכך הוחלט במשרד הביטחון להקים את האתר בבית הקברות הצבאי בהר הרצל, שהוא בית הקברות הצבאי המרכזי של מדינת ישראל המתנשא באופן סמלי מעל אתר מוזיאון "יד ושם" להנצחת קורבנות השואה. בבית קברות זה, המשתרע על פני יותר מ-50 דונם, הוקמו במרוצת השנים שמונה אנדרטאות לאומיות לזכר נעדרים וחללים שנקברו מחוץ לישראל וברחבת הטקסים שבו נערכו באופן קבוע הטקסים הממלכתיים של יום הזיכרון. רק בשנת 2012 אישרה הממשלה את הקמת אתר ההנצחה הלאומי בהר הרצל והקציבה לכך 40 מיליון ש"ח. התוכנית האדריכלית של ההיכל היו קיימות כבר משנת 2002, כאשר משרד האדריכלים

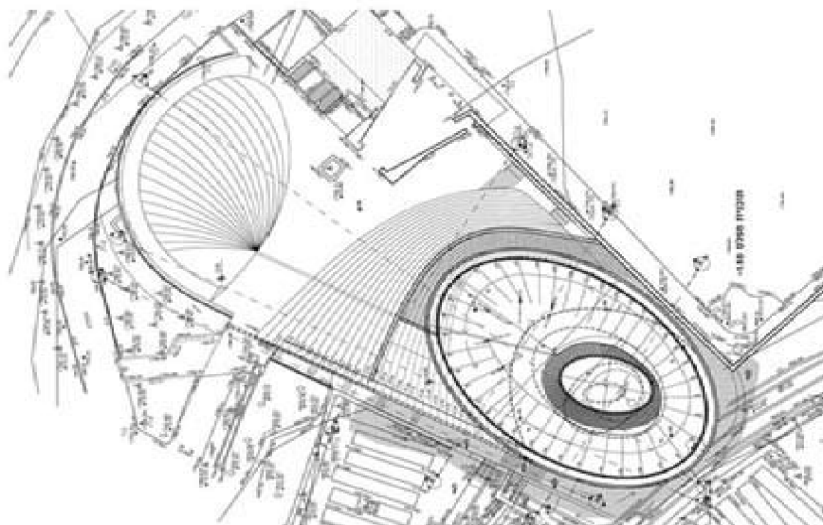
אהוד ברק כיהן כשר הביטחון. זאת, לאחר שתוכנית הנצחה קודמת, עליה החליט מנחם בגין כראש ממשלה עוד בשנות ה-80 של המאה שעברה, נגזזה ב-2007. ממשלת בגין ביקשה להקים



הבול שהוציא השירות הבולאי לרגל חנוכת היכל הזיכרון הלאומי ביום הזיכרון לחללי מערכות ישראל השנה

היכל הזיכרון הלאומי נחנך ביום הזיכרון האחרון לחללי צה"ל ומערכות ישראל. מבנה ההיכל, שנבנה ליד הכניסה לבית הקברות הצבאי בהר הרצל בירושלים, כששורות ארוכות של מצבות אבן אחידות מובילות בצידו אל מעלה ההר. זהו מבנה ייחודי, מרשים, מקרין הוד והדר ומעורר יראת כבוד, על סף תחושת קדושה.

על הקמת פרויקט ההנצחה הממלכתי בצורת קיר ארוך שבו יהיו חקוקים שמות כל חללי מערכות ישראל לדורותיהם מאז שנת 1873 – דוגמת קיר הנצחת חללי מלחמת וייטנאם עשוי סלע "גברו" שחור, הדומה מאוד לבזלת, שנבנה בווייטנאם הבירה לאורך 75.41 מ' ונושא עליו את שמות 58,191 החללים, או קירות הזיכרון בחצר מוזיאון המלחמה האוסטרלי בקנברה, עליהם חרותים שמות 102,185 החיילים האוסטרלים שנהרגו במלחמות שונות – הוחלט כבר ב-2010, כאשר



התוכנית האדריכלית של מפלס 1.50 – של "היכל הזיכרון" שתכננו משרדי האדריכלים "קימל אשכולות" ו"צ'צ'יק קלוש". מימין רצפת ההיכל; משמאל הירידה במדרגות אל פתח ההיכל; למעלה משמאל הכניסה לבית העלמין הצבאי ולמטה חלקות הקבורה

במשרד הביטחון, שמינה את איילת זינגר כמנהלת פרויקט ההקמה. עתה נותר רק לראות איך מבצעים מבחינה הנדסית את הפרויקט המסובך ויוצא הדופן המציב אתגרים הנדסיים וטכנולוגיים חסרי תקדים רבים. מול האתגר הזה היו צריכים להתמודד המהנדסים האחים, חיים ויחיאל שטיינברג.

הבנוי מ-6,500 לבנים עם רווחים ביניהן, שכאילו מרחף בחלל המרכזי של ההיכל ומיתמר בעקלתון באורך של 18 מ' כלפי פתח עגול שנפער בגגו של ההיכל, ממנו חודר אור שמש טבעי פנימה. אולם חלפו עוד שנתיים מאז אישרה הממשלה את הקמת ההיכל עד להנחת אבן הפינה שלו ועוד שנה עד שהחלה בנייתו מטעם אגף ההנדסה והבינוי

התל-אביבי "קימל אשכולות", של האדריכלים איתן קימל ומיכל קימל-אשכולות זכה בתחרות האדריכלית לעיצובו, בשיתוף עם האדריכלים הצעירים לירן צ'צ'יק וניצן קלוש. האדריכלים עיצבו מבנה אליפטי מדורג, דמוי לפיד, הבנוי משכבות מרווחות של אבן למרגלות ההר, שהכניסה אליו היא מקומת הקרקע שלו, אליה יש לרדת מכיכר מדורגת המשתרעת לרגליו. קירות הבטון בהיקף החיצוני של המבנה הן בגובה 12 מ'. בהיכל עצמו מתחיל מסלול ספיראלי עם רמפות סיבוביות בארבעה מפלסים בהיקף המבנה. הקירות הפנימיים הם קירות בטון אדריכלי בגובה ארבעה מ'. לאורך הקירות החיצוניים של המבנה תוכנן "קיר השמות" – קיר באורך 260 מ' המורכב מלבנים, שעל כל אחת מהן מוטבע שמו של אחד מ-23,544 המונצחים והמועדים העברי והלועזי של נפילתו. בין הקיר החיצוני לקיר השמות יש מסדרון המיועד לשירותים לוגיסטיים ולהפעלת מערכות המולטימדיה המתקדמות הרבות שבו, כמו למשל, הדלקה אוטומטית של נר זיכרון והקרנת תמונתו של החלל ביום הזיכרון לנפילתו. האלמנט הפנימי המרכזי שתוכנן במבנה הוא "פעמון האור" – מגדל מפותל חלול



מבנה "פעמון האור" שבמרכז היכל הזיכרון לאחר השלמתו כשמעליו הקורות המיועדות לנשיאת הסקיליט



התחלת הבנייה של היכל הזיכרון עם החומה המפרידה בינו לבין המצבות של בית הקברות הצבאי המרכזי בהר הרצל

תבניות בהדפסה תלת-מימדית

"לפני כחמש שנים, לאחר שהממשלה אישרה את הקמת האתר, פנו אלינו האדריכלים שתוכניתם זכתה בתחרות הסגורה לעיצוב אתר הזיכרון בהצעה שהתכנן את הקונסטרוקציה של המבנה", מספרים חיים ויחיאל שטיינברג. "הם הכירו אותנו מעבודה משותפת בפרויקטים הרבים הקודמים שתכננו והמליצו עלינו בפני מנהל הפרויקט, מהנדס ערן גרבר, מבעלי חברת "אשל הנדסה", שניהלה את פרויקט הבנייה. קיבלנו על עצמנו את המשימה ומאז ועד לחנוכת ההיכל ב-30 באפריל השנה היא הפכה לנושא המרכזי שבו עסקנו ומילא את רוב זמננו וחיינו.

"קיבלנו את הרעיון, התוכניות האדריכליות וצילומי ההדמיה של ההיכל, ועד מהרה הבנו שמדובר במבנה מרחבי, שקשה מאוד לפרוש אותו לתוכניות הנדסיות. שכן, המבנה מורכב מרמפות זיזיות סיבוביות מרחביות לאורך קיר היקפי, שלאורכן ייבנה קיר השמות הפנימי, המורכב מלבנים בודדות עם רווחים ביניהן. במרכז המבנה תוכנן 'פעמון האור' הבנוי אף הוא מלבנים מרווחות, הנראה כאילו הוא תלוי באוויר, אך נשען למעשה על הרמפה הראשונה. "היה מדובר במבנה בלתי רגיל,

היקפית מפלדה שעליה תונח תקרת ה'סקיילייט'.

"העיצוב הייחודי הזה גרם לכך שהיה צורך לתכנן קונסטרוקציה שתישא עומסים גדולים במיוחד – של המפתח הגדול, של האיטום, של הזיון, של מדרגות האבן החיצוניות לגובה כל המבנה ועל כל זה גם את עומסי הקהל, שחלק ממנו בוודאי יטפס על המדרגות עד לגג המבנה, למרות שהן לא נועדו לכך. הן פשוט מזמינות קהל. היה עלינו להשקיע עבודה רבה בחישובים של עומסים עד שבסופו של דבר הצלחנו למצוא פתרונות הנדסיים מתאימים

המורכב למעשה משני מבנים – המבנה הקונסטרוקטיבי ומבנה ה'פעמון' המורכב בתוכו, שהוא קונסטרוקציה העומדת בפני עצמה. לבניית שני המבנים היה עלינו להכין תוכניות רבות לביצוע, שהכילו את כל מהלך ההישתנות של המבנים במרחב בגובה. בנוסף לכך, תוכנן המבנה גם עם גג מיוחד: גג מרחבי קמור מבטון מזוין על מפתח עגול בגודל של 25 על 25 מ' שבשיאו פתח עגול שיכוסה ב'סקיילייט', כדי להחדיר פנימה אור שמש טבעי. כדי להניח את ה'סקיילייט' על הפתח הפעור היה צורך לתכנן מעין כתר – קונסטרוקציה



הפתח בגג ההיכל לאחר פירוק תבניות יציקת הבטון החשוף של המבנה



קונסטרוקציית מבנה "פעמון האור" הבנוי מ-6,500 לבנים עשויות מאלומיניום



חלקי תבניות היציקה העשויות פולימר מיוחד שיוצרו בהדפסה תלת-מימדית עבור קימרון גג מבנה ההיכל

12 ק"ג. כל לבנה כזאת מחוברת ללבנים שמעליה ומתחתיה ומותירה חלל בינה לבין הלבנים שמצידה. בסך הכל יש ב'פעמון', שגובהו 13 מ' (בסיסו 'מרחף' בגובה חמישה מ' מעל פני הקרקע) 130 שורות של לבנים. זהו בהחלט מבנה חזק ויציב המעורר התפעלות, שכן העומד מתחת לפעמון מתקשה להבין מה 'מחזיק אותו באוויר'. מה שעושה זאת היא טבעת פלדה מדורגת בעובי 20 מ"מ היושבת על סמכי נאופרן, כדי שלא תהיה עליה השפעה תרמית ותעמוד גם ברעידות אדמה. סמכי הנאופרן יושבים על קונסולות בטון הבולטות מהרמפות. "בתכן ה'פעמון' הושקעו מאות שעות עבודה שלנו בשיתוף עם מנת"ק – מנהלת פרויקט טנק – ה'מרכבה' במשרד

"בעיה נוספת שהיה עלינו להתמודד עימה הייתה העובדה שכל המבנה נמצא למעשה בתוך חפירה שנחפרה בצלע ההר. הקרב של המבנה להר יצרה מגבלות בבניית קירות המבנה, שצורתם היא קשתית. הצענו להרחיב את החפירה מה שהקל גם על עבודות האיטום של המבנה, שהתאפשר לבצען ללא מגבלה.

"נושא בפני עצמו היה תכנון בניית 'פעמון האור', המכונה כך משום שהוא מכניס את אור השמש אל תוך ההיכל. ה'פעמון' היה רעיון של האדריכלים שנולד מתכנון שוויצרי של מבנה שנבנה על-ידי רובוט. בהיכל היה צריך להרכיב אותו בכוח אדם מ-6,500 לבני אלומיניום, שמשקל כל אחת מהן הוא

לכל הבעיות הסבוכות שיוצר מבנה מורכב כזה.

"בגלל המבנה המרחבי של הגג, שהוא קימרון, קירוי קשתי לא סימטרי (כמו כל הפרויקט שאין בו שום חלק סימטרי), היה עלינו לבצע חישובים מיוחדים של התמכים. שכן, המבנה הייחודי מייצר כוחות אופקיים חזקים, שעקב שינויים בטמפרטורה משתנים גם הם. על כן השתמשנו בסמכי נאופרן, בדומה למבני גשרים, כדי לאפשר חופש הזזה אופקית ולנטרל השפעת כוחות אופקיים. בנוסף נעשה גם ברמפות וגם בגג שימוש בזיון בקוטר קטן, על מנת שיהיה נוח להניח את הברזל לפי תוואי הבטון.

"כל הבטון במבנה הוא בטון חשוף. לכן, בגלל צורת הקימרון הלא סימטרי, נעשה כאן – לראשונה בישראל, לדעתנו – שימוש בתבניות יציקה בהדפסה תלת-מימדית, שיוצרו על-ידי חברת 'קסנום' מראשון לציון. התבניות העשויות פולימר מיוחד הורכבו באתר ויצרו תחתית מושלמת ליציקה, כפי שביקשו האדריכלים. לצורך זה הכינו האדריכלים תוכניות בתלת-מימד, נתנו אותן למודד שסימן כל נקודה ונקודה במרחב, וכך ניתן היה להדפיס תלת-מימדית את התבניות".

מהנדסי טנקי המרכבה נחלצים לסייע

ממשיכים האחים המהנדסים שטיינברג ומספרים: "לאחר שהגענו למסקנה שרמפה מקונסטרוקציית בטון לא תוכל לשאת את כל העומסים של המבנה תכננו עבורו קונסטרוקציית פלדה. כתוצאה מכך הגענו לעלות גבוהה יותר ב-20 אחוזים ממה שהוצב לקונסטרוקציה בתקציב בניית ההיכל. בשלב זה ביקש מנהל הפרויקט שנבצע שינוי דרסטי בתכנון שיאפשר לעמוד בתקציב. כאלטרנטיבה לקונסטרוקציית הפלדה הצענו להוסיף עוד שישה עמודי פלדה לששת עמודי הפלדה שהיו בתכנון המקורי במפלס התחתון של ההיכל, כך שבסך הכל יהיו 12 עמודים שישאו את העומסים. כך ניתן יהיה להחזיר את הרמפה למבנה בטון. תוספת העמודים הוזילה את עלות הבנייה ב-20 אחוזים. האדריכלים קיבלו בברכה את תוספת העמודים ומנהל הפרויקט, ערן גרבר, נתן את האור הירוק להתחיל בבנייה.

הביטחון, ורפ"ט – הרשות לפיתוח טנקים בחיל השריון, שהיא הגוף המתכנן ומפתח של הטנק. הם הוכנסו לתמונה לאחר שהתברר שרצונות האדריכלים שהלבנים ב'פעמון' יהיו לבני בטון, הן בעייתיות לביצוע. הסתבר שהלבנים במודל השוויצרי ממנו נשאב רעיון ה'פעמון' חוברו זו לזו בדבק בלבד והשימוש בדבק לקונסטרוקציה שאינה אנכית אינו תקני לא בשווייץ ולא בארץ.

לאחר חישובים רבים התברר גם שלא ניתן לבנות כך את ה'פעמון', שכן הוא לא יוכל להחזיק את עצמו. כתחליף הציע משרד הביטחון את מנת"ק ורפ"ט, כמומחים בעבודות פלדה, כקבלני משנה שילוו את בניית 'פעמון האור'. "מהנדסי שני גופים אלה – עימם עבדנו בשיתוף פעולה מדהים כשכל הדיונים עימם היו מקצועיים וחבריים – הציעו לנו לבנות את ה'פעמון' מפרופילי

אלומיניום הנדסיים ייחודיים. הם הכינו אב טיפוס של לבנת אלומיניום, ממנו גזרו עוד שני חתכים בגדלים שונים. כך קיבלנו שלושה סוגים של חתכי לבנים – כולן בגובה 10 ס"מ, אבל באורך 30, 40 או 60 ס"מ. משום שמבנה ה'פעמון' אינו סימטרי כל לבנה שנגזרה עבורו הייתה ייחודית במרחב וממוספרת לפי השורה בה היא תורכב ולפי מיקומה בשורה. הלבנים חוברו באמצעות ברגי פלדה של שלושת רבעי אינץ' באורך ארבעה ס"מ. מאחר שחיבור אלומיניום ופלדה גורם לשיתוך התקינו מהנדסי רפ"ט אינסטרי פלדה בעיבוד מיוחד בתוך החורים שנקדחו בלבנות האלומיניום, כך שניתן יהיה לחברן באמצעות ברגי פלדה".

מירוצ נגד הזמן להשלמת המבנה

"בתכנון הרמפות הבאנו בחשבון כל עומס אפשרי שיועמס עליהן בעתיד, בין אם מדובר במחלקת חיילים הרוקעת ברגליה בצעד אחיד, או הסעה של קלנועי נכים", מוסיפים ומספרים המהנדסים שטיינברג. "ביצענו בחינה דינמית של כל תנועה אפשרית על גבי הרמפות כך שלא תורגש. זה חלק מהיותנו קונסטרוקטורים. "הקבלן המבצע של עבודות הקונסטרוקציה



אילן אדדי, שבנו ליאור הוא מהנדס בחברת ההנדסה של האחים שטיינברג, מדביק על "קיר השמות" את הלוח הנושא את שם אחיו, משה אדדי ז"ל, שנפל במלחמת יום הכיפורים



מתכנני הקונסטרוקציה של "היכל הזיכרון", האחים חיים (מימין) ויחיאל (משמאל) שטיינברג, עם נשותיהם, בליל המירוצ להשלמת מבנה ההיכל, ערב חנוכתו



בארץ ובחו"ל, בעיקר בפולין.

בין השאר, תכננו תכנון קונספטואלי את מלון "הילטון" בוורוצלב ומבני

מגורים בקרקוב. בארץ תכננו, בין השאר, את מבנה מלון W היוקרתי במבנה ההיסטורי מהמאה ה-19 של בית החולים הצרפתי ביפו ואת מגדל "רובע לב העיר" ברחוב בלפור בתל-אביב.

תושב גבעתיים. אב ל-3 וסב ל-4.

מהנדס חיים שטיינברג

יליד רמת-גן 1953. בוגר בית הספר "אורט טכניקום" גבעתיים במגמת הנדסת בנייה. בצה"ל שירת ביחידת הנדסה קרבית. לאחר מכן למד בפקולטה להנדסה אזרחית בטכניון בחיפה מחזור 1979.

עבד כמהנדס שכיר בחברות הנדסיות בתחום בניית מבנים מוגנים. ב-1988 פתח משרד תכנון הנדסי עצמאי, כאשר ב-1995, הצטרף אליו למשרד אחיו הצעיר, יחיאל. עוסקים בתכנון מבנים פרטיים וציבוריים, מבני תעשייה וחניונים תת קרקעיים



לימודיו עבד במשך שנתיים בחברת ייצור המטוסים "בואינג" בארה"ב, שם היה בין מתכנני מטוס הנוסעים הסילוני

"בואינג 777". חזר לארץ ולתעשייה האווירית. ב-1995 החליט לחזור גם להנדסה האזרחית והצטרף למשרד התכנון של אחיו חיים.

תושב ראש העין. נשוי + 3.

מהנדס יחיאל שטיינברג

יליד רמת-גן 1956. בוגר בית הספר "אורט טכניקום" בגבעתיים.

שירת בהנדסה קרבית בצה"ל. בוגר הפקולטה להנדסה אזרחית בטכניון מחזור 1982.

לקראת סיום לימודיו שירת בלבנון כחייל מילואים במלחמת "שלום הגליל" ונפצע בעלותו על מוקש בין צור לצידון. בשנת 1985 עבר לתעשייה האווירית והמשיך בלימודי תואר שני בהנדסה מיכאנית. לאחר שהשלים את

והבנייה הייתה חברת הבנייה 'אשר גרין מבנים בע"מ', שלא היכולות, הנחישות, החריצות וההתמדה של עובדיה, בניצוחו של המהנדס הראשי שלה, נדב רובין, לא ניתן היה להשלים את בניית ההיכל במועד שנקבע. לנו היה שיתוף פעולה יוצא מהכלל עימם. אולם, שלושה שבועות לפני מועד חנוכת ההיכל לא הצליחו העובדים לסגור חלקו העליון של ה'פעמון'. נאלצנו לעצור את התקדמות הבנייה ולהזמין מחברת BTI, המייצרת פרופילי אלומיניום הנדסיים שהייתה קבלן הייצור של לבנות ה'פעמון', שלוש שורות של לבנים חדשות במקום הלבנים בשורות העליונות. עבר שבוע עד שקיבלנו את הלבנים החדשות. עובדי 'גרין' ניהלו מירון נגד השעון ועבדו 24 שעות ביממה כדי להרכיב את הלבנים.

הם הפסיקו לעבוד רק בשבת. "השורה האחרונה של הלבנים ב'פעמון האור' הורכבה רק בשעה 11.00 בלילה במוצאי השבת, ה-29 באפריל, שקדמה ליום חנוכת ההיכל. טבעת הפלדה הסוגרת את ה'פעמון' הותקנה רק בשעה ארבע לפנות בוקר. את תקרת ה'סקייליט' מעל הפתח העליון של ההיכל לא ניתן היה להשלים במועד וטקס חנוכת ההיכל נערך אמנם בתוך ההיכל, אולם למעשה תחת כיפת השמיים".



דרך עפר בע"מ

דרך עפר בע"מ

