

המבנה הגבוה בעולם

אלי תבור*

● מנת הריסון של מבנה בטון מזוין היא גבוהה פי שניים בהשוואה למבנה פלדה, ומפחיתה את הכוחות הדינמיים המופעלים על המבנה הגבוה כתוצאה מרוחות, וכן את עלות הבנייה.

● שיפורים בתערובות בטון, כולל חוזק ומודול אלסטיות (E) עשו את בניית המבנים הגבוהים למושכת יותר. גם השימוש בבטון המצטופף מעצמו (SCC) הולך וגדל.

● מבני בטון הם שקטים יותר, גורם שהוא בעל חשיבות רבה במבני מגורים.

● בטון מבני עמיד באופן טבעי בפני שריפות.

● באמצעות השימוש בתקרות בטון מקשיות קטן גובה הקומה ברוטו, מה שחוסך עלויות.

● שיטות טפסנות חדישות בבניית קירות אנכיים ורצפות מבטון הגדילו את פריזת העבודה.

- שיפורים בטכנולוגיית השאיבה והשימה של הבטון, מאפשרים כיום העברה מהירה וקלה של הבטון לכל גובה ולכל פינה, ומשחררים את העגורנים לעבודות אחרות.
- קבלנים גדולים רבים מייצרים בעצמם את הבטון הדרוש להם, דבר שלא נטו לעשות בשלדי הפלדה, ויכולים להציע יותר שינויים ורעיונות חדשים.



מבנה בורג' דובאי מתנוסס מעל גורדי השחקים הרבים שנבנו ונבנים בנסיכות הנפט. העגורנים בראש המגדל ניצבים בתמונה על גבי הקומה ה-146

“בורג’ דובאי” – מגדל דובאי בערבית – הוא כבר כיום, עוד לפני שהושלמה בנייתו, המבנה הגבוה ביותר בעולם, והוא עוד מוסיף ו“צומח” לגובה. ב-25 במארס השנה התנשא כבר הגבוה במגדלי העל הרבים שנבנו ונבנים בנסיכות הנפט לגובה של 629 מ’ ובכך הוא חלף על פני התורן של אנטנת הטלוויזיה של תחנת KVLV-TV בצפון דקוטה שבארה”ב, שגובהה 628.8 מ’, ועל פני בניין 101 Tapei בטייפה שבטייוואן, שגובהו “רק” 509 מ’ ומחזיק כיום בתואר של המבנה המאוכלס הגבוה בעולם. היה רק מבנה מעשה ידי אדם אחד גבוה יותר מאלה. היה זה התורן של אנטנת הטלוויזיה

של רדיו ורשה בקונסטנטינוב שבפולין, שהתנשא לגובה של 646.4 מ’ עד שקרס ונפל בשנת 1991.

גובהו הסופי של בורג’ דובאי נשמר בסוד, כמו גם מספר הקומות שיהיו בו. אולם על-פי מקורות יודעי דבר יהיה גגו של מבנה הבטון בן 160 הקומות, כאשר יחל אכלוסו בספטמבר 2009, בגובה של 643.3 מ’ ואילו הצריח החרוטי של אנטנת הפלדה שתוצב עליו יתנשא עד לגובה של 818 מ’.

בעת שמאמר זה מתפרסם הולכת ונשלמת בניית שלד הבטון המזוין של המגדל ומתחילה בניית שלד הפלדה של הצריח העליון. רק לכשתושלם בנייה זו ניתן יהיה לדעת בדיוק את גובהו של הבניין.

בעולם קיימת כיום נטייה גוברת והולכת לבניית מבני בטון סופר גבוהים (מעל ל-80 קומות) מהסיבות הבאות:

* תורגם על-ידי אלי תבור מתוך כמה מקורות. המקור העיקרי הוא Concrete Construction, גיליון פברואר 2008, שהובא לדפוס על-ידי אינג’ דוד סרנה

התכנון האדריכלי וההנדסי מתפתחים יחדיו

עבודת צוות בין האדריכלים למהנדסי המבנים נוצרת כבר בתחילתו של פרויקט דוגמת בורג’ דובאי. ההתמודדות עם כוחות הרוח מהווה אתגר הנדסי משמעותי. הכוחות משוככים חלקית באמצעות עיצוב צורות המשטחים החיצוניים. ביל בייקר, שותף בחברת האדריכלים והמהנדסים Skidmore,



צילום מחודש פברואר 2008 המראה את התקדמות הבנייה בבורג' דובאי

Owings & Merrill (SOM) משיקאגו, שהוא מהנדס המבנים של המגדל, מספר כי פותחו דגמים שונים של המגדל שנבחנו במנהרות רוח על מנת להפחית ככל הניתן את כוחות הרוח. מניעת מערבולות רוח נלקחה אף היא בחשבון. כאשר הרוח נעה מסביב למבנה היא יוצרת משבים ספירליים המניעים את המבנה מצד אל צד ומחוללים כוחות רוח הרמוניים שעלולה להיות להם השפעה רבה (תהודה).

ניתן להפחית כוחות אלה על-ידי שינוי הרוחב והצורה של הקומות לגובה המגדל. במהלך ניסויי מנהרת הרוח ביצעו בייקר והאדריכל הראשי של הפרויקט שינויים מבניים ועיצוביים של הדגם לאחר כל ניסוי עד שהצליחו להפחית למינימום את השפעת כוחות הרוח על המבנה. הם השתמשו במנהרת הרוח גם כדי לבצע ניסויי גמישות אירו-אלסטית בדגם.

SOM הצליחה לטפל ולהשתלט על השפעת הרוחות במגדל דובאי על-ידי הוספת גרעין למגדל - שלושה אגפים בצורת האות Y. כמו מערכת השורשים האופקית של עץ תומך גרעין זה את המבנה ומפחית את כוחות הפיתול מבלי להתחשב בכיווני הרוחות.

לארי נובק, מנהל שותף ב-SOM, אומר כי מבנה מגדל טראמפ בשיקאגו (שתוכנן אף הוא על-ידי החברה), שבניית 92 קומותיו תושלם בשנת 2009 עד לגובה של 415 מ', שונה

לחלוטין ממגדל דובאי. זאת, משום ששורות העמודים שלו מוסטות ככל שהמבנה מתכנס, מה שמחייב קורות מגשרות על מנת לשאת את העומס מעמוד אחד לשני. עבור מגדל דובאי הוצבו העמודים בשורה עד לקצה המבנה. ככל שתקרת הקומה הולכת וקטנה במידותיה, מסתיימות שורות העמודים. לאורכו של המגדל יש 27 נסיגות כאלה במידות התקרות כדי לרסן את כוחות הגזירה של הרוחות ואת מערבולות האוויר. הבנאים הציבו קירות היקפיים מבטון כל 30 קומות כדי להוסיף חוזק וקשיחות אופקית מסגרתית לעמודים.

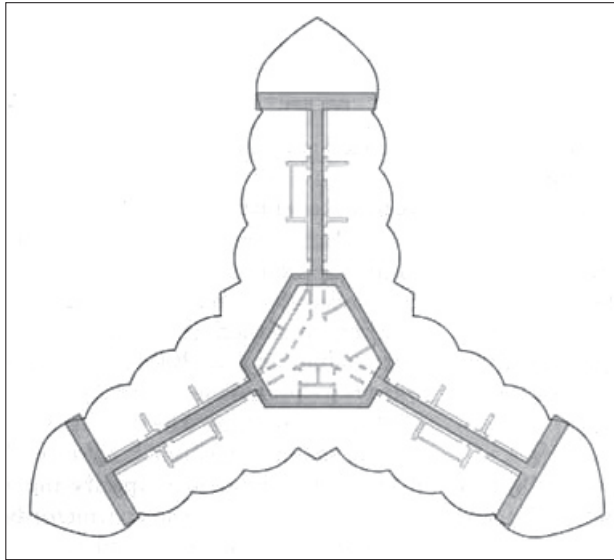
על גבי הכלונסאות יצוקה דברה בעובי של ארבעה מטרים, של בטון המצטופף מעצמו (SCC), בעל תכונות ריאולוגיות שמאפשרות יציקה ללא גריפה או ריטוט. הגרעין, המתמכים והעמודים נתמכים כולם על-ידי לוחות המסבכים. קירות הגרעין מתחילים בעובי של 65 ס"מ ומצטמצמים בהדרגה לעובי של 50 ס"מ בקצה העליון של המבנה. עובי התקרות בקומות התחתונות הוא 20 ס"מ ואילו עובי תקרות הקומות המיכאניות הוא 30 ס"מ. בכל המגדל לא נעשה כלל שימוש בדריכת אחר.

דרישות הבטון

בחברת SOM מאמינים, כי מודול האלסטיות (E) של הבטון חשוב באותה מידה כמו חוזק הלחיצה עבור בניית מגדלי-על. לבטון בעל צפיפות רגילה יש מודול אלסטיות של 14,000 עד 42,000 מגפ"ס, בעוד שהדרישות לבטון במגדל דובאי הן 44,000 מגפ"ס ב-90 יום. לאיכות חומר האגרטים יש השפעה רבה על מודול האלסטיות אבל SOM החליטה לאפיין את מודול האלסטיות הדרוש להם ולאפשר לקבלן לשאת באחריות

האלמנטים המבניים

מבנה מגדל דובאי נתמך על-ידי 194 כלונסאות בטון בקוטר של 1.65 מ' ובעומק של כ-50 מ' כל אחד. בייקר מספר כי לתת-הקרקע באתר הבנייה יש תכולה גבוהה של כלוריד וגופרית והיא מורכבת מסלע גיר שנוצר מסחופת. בטון הכלונסאות הינו צפוף באיכות גבוהה ומספק את ההגנה מפני הקרקע הגופריתית.



שרטוט תוכנית מגדל דובאי המראה את הגרעין המתנגד לכוחות הגזירה של הרוחות ומפחית את תנועת הפיתול של המבנה



צילום המראה כיצד יראה בורג' דובאי לכשתושלם בנייתו, כשמסביבו מגדלי העל האחרים של דובאי

- דוברת: SCC עם מינימום 42 מגפ"ס
 - קירות גרעין והעמודים עד לקומה ה-126 ובקומות 154 ו-155: חוזק מינימלי של 82 מגפ"ס
 - קירות גרעין והעמודים מהקומה ה-126: חוזק מינימלי של 63 מגפ"ס
 - תקרות: חוזק מינימלי של 35 מגפ"ס
- נובק אומר שאיכות הבטון הייתה מצוינת. התערובות לעמודים ולקירות שהיו אמורים להיות בחוזק של 82 מגפ"ס הגיעו למעשה ב-56 יום לחוזק של 105 מגפ"ס עם מודול אלסטיות של 49,000 מגפ"ס.

טפסנות ושימת הבטון

בייקר אומר, כי ההתקדמות האחרונה בטכנולוגיית הטפסנות סייעה בעשיית הבטון המבני לאטרקטיבי בבנייה. הדבר נכון גם לגבי משאבות הבטון, המסוגלות כיום לשאוב בטון עד לגובה של 625 מ', במקרה הזה.

חברת Doka מלורנסוויל, ג'ורג'יה, המייצרת ציוד לבנייה, סיפקה את הטפסות לקירות לתוכן נוצק הבטון עבור 428 אלף הטונות של קירות המגדל. קירות הגרעין נבנו באמצעות טפסות מתרוממות כשזרוע יציקת הבטון רכובה על החלק העליון של הטפסה. זרוע זו מתקדמת כאשר הטפסה מתרוממת.

הרוחות באתר הבנייה של המגדל אינן מאפשרות שימוש בטפסות מלוחות לבניית התקרות ומשום כך השתמשו הבנאים במערכות של טפסות ידניות שיוצרו על-ידי חברת Meva Formworks Systems, מספרינגפילד, אוהיו, לבניית משטחי התקרות.

משאבת הבטון שמשתמשים בה במיזם היא הגדולה ביותר המיוצרת בחברת משאבות הבטון Putzmeister. ביל קארבו, מנהל המכירות של החברה אומר, שמשאבה זו יכולה לייצר לחץ של עד 400 טמוספרות, למרות שבמגדל דובאי די בלחץ של 200 טמוספרות. יתרת הלחץ היא קיבולת רזרבית. בזרוע היציקה הלחץ הוא 3.5 אטמוספרות לערך, על מנת

על פרטי תערובת הבטון.

כשיש מאות יציקות בטון במהלך הבנייה, הזחילה וההצטמקות בשיעורים שונים במרוצת הזמן עלולות להיות קריטיות לגבי מבנים כמו מגדל דובאי. מסיבה זו, טוען נובק, הוחלט להשתמש בתערובת אחת של בטון לכל העבודה האנכית ברומ של קומה נתונה, תוך שמירת אותם יחסי פני השטח-נפח עבור העמודים וקירות הגרעין (עובי העמודים והקירות הוא זהה). בדרך זה הצטמקות הבטון תהיה אחידה ותהיה לה רק השפעה מעטה על המבנה.

ג'יימס אלדרד, מסוכנות האימות והבדיקות העצמאית IVTA אומר, כי רוב תערובות הבטון הן "תערובות משולשות" הכוללות צמנט פורטלנד, אפר פחם ומיקרו-סיליקה (דו-תחמוצת הצורן, שהיא תוצר לוואי של ייצור סיליקון לתעשיות האלקטרוניקה והפלדה, ומשמשת כתוסף פורצלני לייצור בטונים חזקים במיוחד). העבדות שלהם מוגברת באמצעות סופרפלסטיסייזרים פוליקרבוקסיליטיים (carboxylate superplasticizers) - תוספים אשר יוצרים מבנה מיקרו-נקבובי של המטריצה הצמנטית - בעוד שמנת המים-צמנט נשמרת מתחת ל-0.32 עבור בטונים בעלי חוזק גדול יותר. לדברי אלדרד, למרות שנעשה שימוש בריטוט מסוים במהלך היציקה, ניתן להתייחס לבטון כאל בטון SCC - בטון המצטופף מעצמו.

עד לקומה ה-100 נעשה בבטון שימוש באגרטים בגודל מקסימלי של 19 מ"מ ובגבהים גבוהים יותר השתמשו באגרטים בגודל של מקסימלי של 14 מ"מ, כדי להפחית את לחצי השאיבה. כמויות משמעותיות של קרח הוספו לתערובות כדי לשמור את טמפרטורת הבטון בין 24 ל-32 מעלות צלזיוס. שכן, אפילו כאשר התערובות נעשו בלילה, יכלו הטמפרטורות המקיפות באתר להגיע מ-40 מעלות צלזיוס בלילה ל-49 מעלות ביום בעיצומו של הקיץ.

חוזק קוביות הבטון שנדרש עבור אלמנטים מבניים שונים היה:

- כלונסאות: חוזק מינימלי של 63 מגפ"ס

אתגרי הפרויקט

קשה לתאר עד כמה גבוה הוא מגדל דובאי. ג'ורג' אפסטאטיהו, שותף בחברת SOM, נוהג לומר, שגובהו של המגדל יגיע "בערך" לגובהו של מרכז ג'ון הנקוק בשיקאגו (334 מ', במקום ה-16 ברשימת המגדלים הגבוהים בעולם), אם יציבו אותו על גבי מגדל סירס השיקאגואי (442 מ' ו-520 מ' עם שתי אנטנות הטלוויזיה שהוצבו על גגו, במקום הרביעי ברשימה).

לדבריו, בעלי מגדל דובאי, חברת Emaar Properties, ביקשו לבנות מגדל שיקרין תדמית של עוצמה ושיעשו רושם בעולם כולו. על מנת להשיג זאת הם הזמינו קבוצה נבחרת של חברות תכנון לתחרות משולמת - כזאת שכל המשתתפים בה מקבלים תשלום. לדבריו, האתגר הראשון של SOM היה לספק שרטוטים רעיוניים על מנת לעמוד בקריטריונים אלה. האתגר הבא היה לשלב את כשרונות האדריכלות והנדסת המבנים כדי לפתח מגדל אסתטי שיוכל לעמוד במשבי הרוחות העזים הנושבים בגבהים אליהם הוא אמור להגיע, בחום המדברי ובתנאי הקרקע של דובאי. בשיאו של תהליך התכנון עבדו יותר מ-90 אדריכלים ומהנדסים על הפרויקט.

ככל שתדמית הבניין הייתה חשובה, היה חשוב גם לשלב את קירות ועמודי המגדל למרחבים נוחים ונעימים למשתמשים. כמו כן, גם תכנון מערכות בניין טיפוסיות כמו מערכות אוורור, חימום ומיזוג אוויר, תאורה ומציאת דרכים לניקוי חיצוני של חלונות המגדל, היווה אתגר. כך למשל, בחינת נתוני לווין מזג אוויר לאיסוף נתונים על החום הקיצוני ותנאי הלחות של דובאי סייעו למתכננים לפתח ציוד HVAC (אוורור, חימום ומיזוג אוויר)



צילום הדמיה של מגדל העל אל בורג' המתוכנן להיבנות בדובאי, שיתנשא לגובה של 1,050 מ'

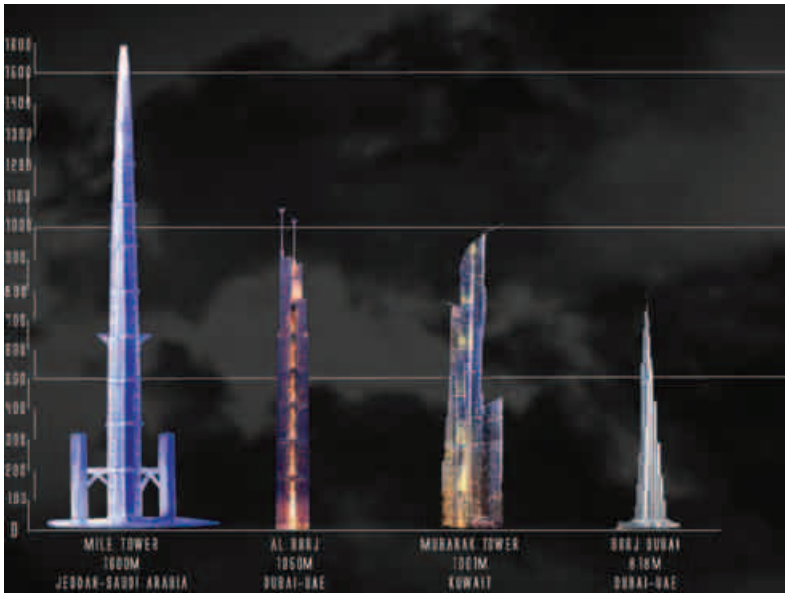


מגדל העל מובארק המתוכנן להיבנות בכוויית בגובה של 1,001 מ'

להבטיח יציקה בטיחותית. המשאבה שוקלת כעשרה טון והיא מונעת באמצעות מנוע "קטרפילר" בעוצמה של 630 כוחות סוס. לדברי קארבו הוחלט להשתמש לצורכי יציקת הבטון בצינור בקוטר של 6 אינץ' במקום הצינור הרגיל בקוטר של 5 אינץ', וזאת כדי להפחית את החיכוך ולצמצם את הסיכון לסתימות במעלה הצינור. החלטה זו, יחד עם תערובות בטון מתוכננות היטב, הפחיתה בצורה משמעותית את שחיקת והתבלות הצינור. יצרנית המשאבה הגרמנית פיתחה גם מכשיר מיוחד, שניתן לגלגלו על פני כל רצפה במבנה על מנת להרים בקלות קוי צנרת אנכיים, שיסייע בתהליך של שחרור סתימות במידה ויווצרו כאלה.

קארבו אומר, כי ניתן לשאוב בטון בצורה אופקית פי חמש מהר יותר מאשר בצורה אנכית, לכן היה חשוב לבצע בדיקות לפני שהוחל במיזם כדי להשתמש בתערובת הבטון שתאושר לבנייה. הבדיקות האופקיות בוצעו סמוך לאתר הבנייה, תוך ניסוי תערובות בטון שונות כדי לקבוע את מקדמי החיכוך ולהבטיח שהמשאבה תוכל להעביר בטון עד לקצה העליון של המגדל.

אפשר להשתומם איך מנקים את הצינור הארוך ביותר בעולם. הדבר נעשה באותה דרך כמו בכל צינור אנכי של מבנה אחר. כדורי גומי מוכנסים לפתח העליון של הצינור. הפתח נחסם ואוויר נדחס פנימה מאחורי הכדורים כשהוא דוחף כ-13.7 מ"ק של בטון במורד מאות המטרים של הצינור (תוך היעזרות בכוח הכבידה) עד לקרקע, משם הוא מפונה במשאיות של מערבלי בטון.



דיאגרמת השוואה בין ארבעת המגדלים ההולכים ונבנים במדינות המפרץ הפרסי ובערב הסעודית, כשהמנצח הוא מגדל המייל בג'דה, שבערב הסעודית, האמור להגיע לגובה של 1,600 מטרים

מגורים ימשיכו להשתמש בבטון מבני. גורדי שחקים מסחריים יהיו מבנים מרוכבים, עם גרעיני בטון ותקרות מקונסרוקציית פלדה במפתחים גדולים. ומה יהיה המבנה הגבוה ביותר הבא בעולם? הוא יכול להיות בהחלט מבנה בטון, עם היתרונות הרבים שיש בחומר בנייה זה.

שיוכל לספוג ולסלק מהמגדל מספיק עיבוי מהאוויר בכמות שנתיית שתוכל למלא 14 בריכות אולימפיות. אפסטאטיהו אומר גם, שהתיאום והתקשורת עבור מיזם בהיקף ובסיבוך כזה, הפרושים על פני כמה אזורי זמן, ממשיכים עד היום להציב אתגרים משמעותיים. החברה הקבלנית משתמשת בטכנולוגייה ממוחשבת מתוחכמת לתכנון, גרפיקה, ואנימציה כדי לסייע לקבלני המשנה ולבנאים להבין את החלקים הקריטיים של תהליך הבנייה.

עתיד מגדלי העל

נראה כי לכשיושלם, לא יחזיק בורג' דובאי זמן רב בשיא הגובה של מבני הבטון. יש כבר מספר מיזמים באופק היכולים להביא את בניית המבנים לרמה הבאה, אומר אפסטטהיו. המבנה הראשון מאלה שכבר נראה באופק הוא מגדל מובארק המתוכנן להיבנות בכוויית ויתנשא לגובה של 1,001 מ', בדובאי עצמה מתכננים לבנות עתה עוד מגדל-על, בשם אל בורג' (המגדל), שיהיה גבוה יותר ממגדל דובאי ויתנשא לגובה של 200 קומות ו-1,050 מ'. ואילו בג'דה, ערב הסעודית, שוקלים עתה לבנות את מגדל המייל בגובה של 1,600 מ' – מייל יבשתי אחד. מה התפקיד שימלא הבטון במגדלי העל? בייקר סבור שבמבני

טכנולוגיות מתקדמות בתחום הבנייה



חומרים מרוכבים לחיזוק מבנים (יריעות פחמן או זכוכית)

- תוספת זיון להגדלת עומסים או תוספת קומות
- תוספת זיון עקב השנויים בסכימה סטטית
- חיזוק מבנים לקבלת העומסים ברעידות אדמה
- מיגון מבנים קיימים מהדף ובלימת השיחון

מוטות זיון מתכתיים ולא מתכתיים לסביבה קורוזיבית

- מוטות פלדה בציפוי נרוסטא בעובי 500-800 מיקרון
- מוטות זיון GFRP הלא מתכתיים ולא מגנטיים
- לבניה בסביבה ימית ולבניית מתקנים כימיים
- למניעת קורוזיה במבנים תת-קרקעים מזרמים תועים
- עוגני קרקע וזיון מיוחד בעבודות מינהור

סיבים פולימרים קונסטרוקטיביים (קשיחים)

- חזקים כמו סיבי פלדה, בלתי מחלידים בסדקים
- ליציקת רצפות ומשטחי בטון ללא רשתות זיון
- לבטון מותז מכל הסוגים בבניית מנהרות ותעלות
- ליציקת קירות מסך ואלמנטים דקי דופן

POWER MESH

טל: 09-7409458 פקס: 09-7423748
powermesh@barak.net.il www.power-mesh.com