

הערכת תסבולת כלונסאות קיימים במזח

פרופ' שמואל פייקובסקי והמהנדסים דני קסורלה וקריסטופר ג'ונס*

המזח הראשי, מפאת גילו המתקדם, הוחלט בחטיבת ההנדסה של חברת נמלי ישראל, שמופקדת על פיתוח הנמלים, לבצע תכנון שיקום ושדרוג. במסגרת תכנון השיקום הוצעו המתכננים – אינג' ישראל קלר ממשרד קלר יעוץ לביסוס ושירותים הנדסיים בע"מ ואינג' ציון זכות ממשרד ציון זכות מהנדסים בע"מ – לבצע בדיקות של הביסוס הקיים הכולל כלונסאות מוחדרים, על מנת להעריך את מצבם ואת הצורך בחיזוקם או החלפתם. חברת נמלי ישראל בחרה בחברת **גאודינמיקה** בע"מ לתכנן ולבצע את הבדיקות, ובחברת מעגן לבצע את העבודות הימיות ואת כל ההכנות הנדרשות לביצוע הבדיקות.

הערכת תסבולת של כלונסאות וניסיונות העמסה

הערכת תסבולת כלונסאות מבוססת על פרמטרי החוזק של הקרקע והמודל החישובי של התנגדות הכלונס. לשניהם חוסר ודאות ניכר שמביא לשמרנות גדולה בתכנון. הכלי העיקרי להפחתת חוסר הוודאות הינו ניסיון העמסה, שבו תסבולת הכלונס נמדדת בשדה תחת העמסה ישירה. נקודת הייחוס ההיסטורית לכל סוגי הניסיונות הינה ניסיון סטטי שבו הכלונס מועמס באמצעות כוח כנגד ריאקציה באופן שמדמה את העומס בפועל. ניסיון סטטי הוא יקר מאוד ואורך זמן רב, לכן בדרך כלל לא מבוצע יותר מניסיון בודד שחסרונותיו קשורים בקושי להגיע לתסבולת, באפשרויות השונות לכישלון ביצוע הכלונס והניסיון, בהכלת התוצאות על שטח גדול ובאינטרפוטציה שאינה חד-משמעית לתוצאות הנמדדות. ניסיונות העמסה דינמיים נכנסו לשימוש בארבעים השנים האחרונות, בתחילה לכלונסאות מוחדרים ולאחר מכן לכלונסאות קדוחים, יצוקים באתר. הניסיונות שלא באמצעות פטיש החדרה, נעשים באמצעות מתקן העמסה מיוחד שמאפשר הפלת משקולת על הכלונס בתהליך מבוקר. הניסיונות הם בבחינת אלטרנטיבה זולה המאפשרת לבצע מספר גדול יחסית של ניסיונות והערכה של תסבולת הכלונסאות בדרגת אמינות גבוהה. מחקרים בהיקף נרחב שמטרתם פיתוח תקינה של AASHTO לביסוס על יסוד אמינות נערכים עבור הניסיונות הדינמיים עבור כלונסאות מוחדרים וקדוחים על ידי Paikowsky et al. 2004, Paikowsky et al. 2013 בהתאמה.

האתגרים בפרויקט

- ככלל, ניסיונות העמסה דינמיים להערכת תסבולת כלונסאות קיימים יותר מורכבים מניסיונות על כלונסאות בזמן ביצוע והם דורשים סימולציות של הבדיקות לחיזוי ותכנון הניסיונות כדי לאפשר שליטה במאמצים שיתפתחו לאורך הכלונסאות במהלך הבדיקה. בפרויקט זה ניצבו בפנינו כמה אתגרים נוספים:
1. המידע הקיים על מצב הכלונסאות במזח היה מוגבל מאוד – המצב בחתך הפנימי של הכלונסאות והאורך שלהם לא היו ידועים. מצבם החיצוני של הכלונסאות הוערך בסקר ויזואלי תת-ימי שהתמקד בזיהוי סידוק בפני בכלונסאות.
 2. המידע על חתך הקרקע היה כללי ולא היו מספיק נתונים המאפשרים לבצע חישובים מדויקים של התנגדות הכלונס הצפויה בתנאי הקרקע הקיימים.



תמונה 1: ניסיון העמסה דינמי בפרויקט ימי – חברת גאודינמיקה

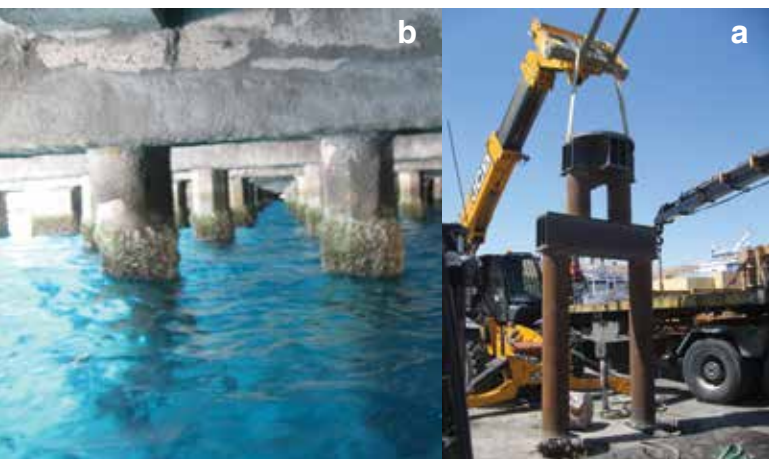
המזח הראשי בנמל אילת נבנה בסביבות שנת 1960. לאור גילו המתקדם הוחלט בחברת נמלי ישראל לבצע את פרויקט שיקום המזח. במסגרת תכנון השיקום נשקלה האפשרות להשתמש בביסוס הקיים ולחסוך את עלות החלפתו, מהלך שדרש בחינה מקצועית מקיפה. הכתבה הבאה עוסקת בהערכת התסבולת והשלמות של הכלונסאות הקיימים במזח הראשי בנמל אילת להמשך שימוש במזח המחודש. מפורטים האתגרים בביצוע הפרויקט, תאור ניסיונות העמסה הדינמיים שבוצעו, וההשלכות והמשמעויות של התוצאות שהתקבלו שאיפשרו את המשך השימוש בכלונסאות הקיימים

רקע כללי על הפרויקט

נמל אילת הוקם בשנת 1957 על ידי משרד התחבורה ועבר למיקומו הנוכחי בשנת 1965. בנמל מזח ראשי באורך 520 מטרים בעומק של 12 מטרים, ומזח מים רדודים באורך 220 מטרים. בפרויקט שיקום

* פרופ' שמואל פייקובסקי – פרופ' באוניברסיטת מסצ'וסטס ומקים החברה; דני קסורלה – מהנדס בחברת גאודינמיקה בישראל; קריסטופר ג'ונס – מהנדס בחברת גאודינמיקה בארצות-הברית.

גיאודינמיקה לכלונס דרך המשטח העליון והקורה שמעל הכלונסאות. המתקן מורכב מחלק עליון המאפשר העמסה דינמית, חלק מרכזי להעברת העומס הכולל צינורות פלדה, שחוצים את משטח המזח דרך פתחים שבוצעו במיוחד לצורך הבדיקות, וחלק תחתון הכולל קורת פלדה ותושבת על ראש הכלונס. תמונות 3 ו-4 מציגים את הכלונסאות והקורה מתחת למשטח העליון ואת מרכיבי המערכת להעברת העומס.



תמונה 3: (a) מבט על הכלונסאות והקורות התומכים את המזח (b) החלק העליון של המערכת להעברת העומס.



תמונה 4: מערכת תימוך זמנית והחלק התחתון של המתקן להעברת העומס

ביצוע הניסיונות

ניסיונות העמסה דינמיים נעשים באמצעות מתקן שמאפשר הפלת משקולות בתהליך מבוקר. המתקן, שתוכנן ונבנה על ידי חברת גיאודינמיקה, משתמש במערכת הידראולית ומאפשר שליטה בגודל מסת ההפלה וגובה הנפילה – כנראה בתמונה 5. הבדיקות דורשות סימולציה מוקדמת של העמסה הדינמית על הכלונס בתנאי הקרקע הנתונים הכוללת מעבר גל המאמץ בכלונס וקביעת מרכיבי הניסיון: משקולת, גובה נפילה ופרטי מערכת ההקשה בראש הכלונס. הניסיון כולל העמסה הדרגתית באמצעות מתקן ההקשה (בהתבסס על הסימולציה המוקדמת וניתוח ראשוני של ההיענות באתר) ומדידות סימולטניות של תאוצות ועיבורים באמצעות חיישנים בראש הכלונס. נוסף למדידות האלקטרוניות מבוצעת מדידה גיאודטית בלתי תלויה של תזוזת הכלונס או המערכת להעברת העומס. כאמור,

3. הכלונסאות הם חלק ממבנה קיים ומשמשים לתמיכה של המזח ולפיכך אין אליהם גישה ישירה. לביצוע העמסת הכלונסאות נדרש פיתוח מערכת העמסה מקורית שתעקוף את הקורה שנמצאת מעל לכלונסאות ותאפשר את העברת העומס לכלונסאות שנותקו מתחתית הקורה.

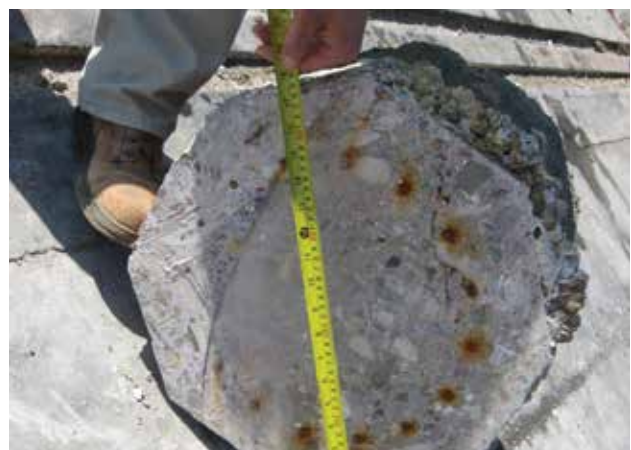
4. המרחק הקצר בין מפלס מי הים לחלק התחתון של הקורה והקצה העליון של הכלונסאות שנבדקו, דרש עבודה ימית לניתוק הכלונסאות והתקנת מערכת ההעמסה. כיוון שראש הכלונסאות המנותקים נמצא מתחת למים בזמן גאות, ציוד המדידה היה תת-ימי והיה צורך להתקינו בצלילה.

5. הכלונסאות שעליהם בוצעו הניסיונות היו צריכים להמשיך לתפקד אחרי הבדיקה לכן אסור היה לגרום להם נזק קונסטרוקטיבי בזמן הבדיקות.

תנאי הקרקע באתר ותכנית הביסוס של המזח

המידע הקיים על תנאי הקרקע באתר מצומצם מאוד והוא מבוסס על סקר ישן שבוצע. הסקר כלל מספר קידוחים בודדים ובדיקות התנגדות לחדירה SPT. על פי הסקר, חתך הקרקע כולל שכבות של חול דק ובינוני, חול טיני וסלע קשה. עומק המים בין תשעה לעשרה מטרים.

הביסוס של המזח כולל כ-1,405 כלונסאות טרומיים מוחדרים. הכלונסאות עשויים מבטון דרוך, בחתך מתומן, ברוחב 40 ס"מ ומרחק אלכסוני, דיאגונילי, של 45 ס"מ. בתמונה 2 ניתן לראות דוגמה לכלונס הנ"ל אשר נמצא בשטח התפעולי של הנמל ולא בוצע בו שימוש וקצה של כלונס שנחתך לצורך ביצוע הבדיקות. נלקחו מדגמים מבטון הכלונסאות שנמצאים בשימוש ואלה שימשו לקבלת פרמטרי הבטון בביצוע הניסיונות.



תמונה 2: קטע מכלונס שנחתך לצורך ביצוע הבדיקות

תכנון הניסיונות והמערכת להעברת העומס

לאחר שבוצעה הערכה של התנאים באתר על ידי חברת גיאודינמיקה ומתכנני הפרויקט, הוכנה תכנית שהביאה בחשבון את מספר הכלונסאות הנדרש לבדיקה ביחס לכלל הכלונסאות הקיימים בהתחשב בשונות תנאי הקרקע באתר. התכנית כללה ביצוע של ניסיונות העמסה דינמיים על עשרה כלונסאות בחמישה חתכים שונים לאורך המזח. לשם ביצוע הבדיקות היה צריך לנתק את הכלונסאות מהקורה שמעליהם, לתכנן תימוך זמני של הקורה ומערכת מיוחדת להעברת העומס ממתקן ההעמסה של חברת

לשמש לביסוס.

דוגמה לתוצאות ניתוח התאמת אותות עבור כלונס TP-22 מוצגת בשרטוט 6. לצד גלי הכוח והמהירות המדודים מוצגת ההתאמה בין הכוח המדוד לזה המחושב שהתקבל ממודל התנגדות הקרקע שנבנה עבור הכלונס. פירוס התנגדות הקרקע של מודל זה לאורך הכלונס גם מוצג באופן גרפי עם סיכום התנגדות כוללת של 229 טון, מזה 183 טון בחיכוך ו-46 טון בהתנגדות קצה. גם הערכת שלמות הכלונס מוצגת גרפית באיור 6. חישובי אימפדנס הכלונס (המייצג את שטח חתך הכלונס, המודול אלסטיות שלו וצפיפותו) לכל אורך הכלונס לא סטו יותר מ-7% מהערך שנקבע בראש הכלונס. בניגוד להערכת שלמות כלונסאות בעיבור נמוך (בדיקה סונית או אולטראסונית) בדיקה בעיבור גבוה (דהיינו העמסה דינמית כמתואר) מאבחנת רק סידוק משמעותי שבו הכלונס לא יכול לתפקד להעברת עומס. אבחון זה מונע אזהקות סרק שמתקבלות בעיבור נמוך מסידוק בלתי משמעותי ובשילוב עם חישובי האימפדנס מאפשרים הערכה ריאלית של שלמות הכלונס וכשירותו לתפקוד. יחסי העמסת כוח סטטי מול תזוזת ראש הכלונס וקצהו מתקבלים מהרכיבים הסטטיים של מודל התאמת האותות ומתארים את היחסים שהיו מתקבלים מניסיון העמסה סטטי. השוואה בין ניסיונות העמסה סטטיים לאלו מחישוב דינמי הראו התאמה מצוינת בכל המקרים.

סיכום ומסקנות

לצורך הערכת התסבולת של כלונסאות קיימים בני למעלה מחמישים שנה, נעשה שימוש בניסיונות העמסה דינמיים. אף על פי שהניסיונות נעשו תחת מגבלות ובתנאים בעייתיים, הבדיקות היו מוצלחות והתוצאות איפשרו לחברת נמלי ישראל להמשיך להשתמש בכל הכלונסאות ללא צורך בשיקומם או החלפתם ובכך לחיסכון כספי ניכר, זמן ומשאבים רבים.

מראי מקום

Paikowsky, S.G. (2013). "Main Pier Restoration Project – Eilat Port Dynamic Load Tests", Final Report, September 27, 2013

Paikowsky, S.G. (2013). "Dynamic Load Testing of Drilled Deep Foundations", Keynote lecture in the Swiss Geotechnic Annual Meeting, Freiburg, Switzerland, 2 May 2013, Vol.166, pp.1-52.

Paikowsky, S. with contributions by Birgission G., McVay M., Nguyen T., Kuo C., Baecher G., Ayyub B., Stenerson K., O'Mally K., Chernauskas L., and O'Neill M. (2004). NCHRP Report 507 Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations, National Cooperative Highway Research Program, TRB, Washington, DC, pp. 134.

חברת גיאודינמיקה עוסקת בשירותי תכנון בהנדסת קרקע וביסוס ומתמחה בתכנון וביצוע ניסיונות העמסה, עבודות ימיות, ניטור מערכות

הקצה העליון של הכלונסאות שנבדקו נמצא מתחת למים בזמן גאות, לכן היה צורך לעשות שימוש בחיישנים תת-ימיים ולהתקין את ציוד המדידה בעבודה ימית ובצלילה. הכלונסאות נבדקו בהעמסה הדרגתית עד לקבלת הרס גיאוסטכני תוך כדי שמירה על שלמות קונסטרוקטיבית. משך הניסיונות ארך עשרה ימים סך-הכול.

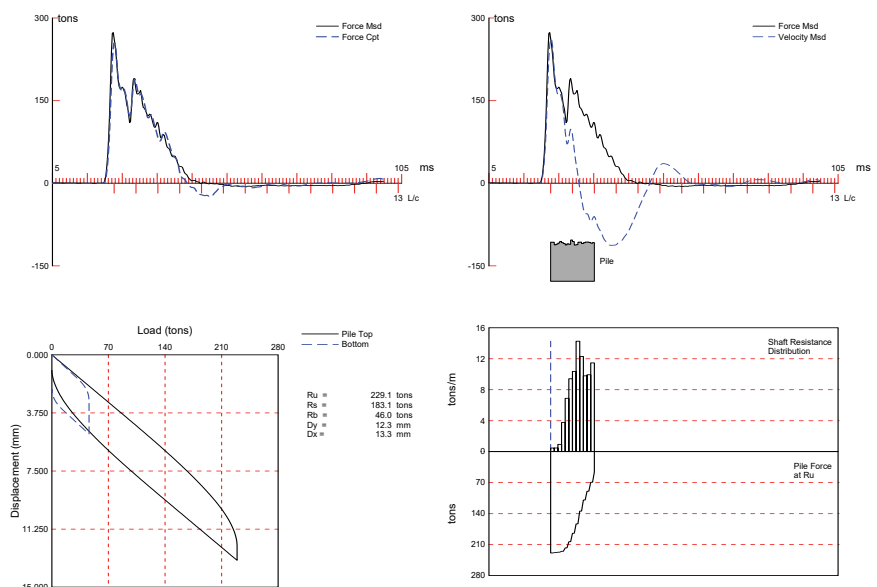


תמונה 5: ניסיון העמסה מגובה נפילה של כ-70 ס"מ

תוצאות הניסיונות

לאחר ביצוע הניסיונות באתר, גיאודינמיקה ביצעה ניתוח של המדידות הדינמיות בשלוש שיטות שונות על מנת להעריך את התסבולת של הכלונסאות שנבדקו. הניתוחים כללו ניתוח התאמת אותות, התאמת אנרגיה ושיטת Case.

למרות האילוצים והתנאים הבעייתיים המיוחדים למזח, תשעה מתוך עשרה ניסיונות הוכתרו בהצלחה והתקבלו עבורם תוצאות אמין. ברוב הכלונסאות התקבלו שקיעות משתירות בטווח של בין חמישה לעשרה מ"מ עבור גויסה מלוא התסבולת הגיאוסטכנית שהייתה בין 175 ל-245 טון בהרס עם ממוצע של 202 טון וסטיית תקן של 22 טון. בכל הכלונסאות נשמרו מאמצי לחיצה ומתיחה בתוך התחום שנקבע כבטוח וכל הכלונסאות נמצאו שלמים וכשרים



איור 6: דוגמאת אנליזת העמסת כלונס W22TP- (a) גלי מהירות וכח מדודים (b) התאמת גל כח מדוד למחושב (c) תאור גרפי של ניתוח אחידות הכלונס (d) פירוס כח התנגדות הקרקע לאורך הכלונס (e) יחסי כח סטטי בראש הכלונס לתזוזת ראש הכלונס ותחתית הכלונס