

# ניסיונות העמסה דינמיים על כלונסאות

פרופ' שמואל פייקובסקי<sup>1</sup> והמהנדס דני קסורלה<sup>2</sup>

## תכנון ביסוס וניסיונות העמסה

הערכת תסבולת כלונסאות מבוססת על פרמטרי החוזק של הקרקע והמודל החישובי של התנגדות הכלונס. לשניהם חוסר ודאות ניכר שמביא לשמרנות שגדלה עם חוסר הוודאות הקיים בתהליך בניית הכלונסאות ואי-הוודאות לגבי שלמותם. הכלי העיקרי להפחתת חוסר הוודאות הוא ניסיון העמסה שבו תסבולת הכלונס נמדדת תחת העמסה ישירה. ניסיון העמסה סטטי שבו הכלונס מועמס באמצעות כוח כנגד ריאקציה היה בעבר האמצעי המקובל למדידת התנגדות הכלונס. ניסיונות אלו יקרים ואורכים זמן רב ואם ההעמסה המתוכננת לא מגיעה לתסבולת הכלונס, אין אפשרות לנצל את תוצאות הניסיון במלואן למטרות תכנון עדכני. ניסיונות העמסה דינמיים שנכנסו לשימוש ב-40 השנים האחרונות הם אלטרנטיבה זולה המאפשרת לבצע מספר גדול יחסית של ניסיונות להעמסה מקסימלית בעלות נמוכה ביחס לניסיון סטטי בודד. מידע כזה מאפשר להעריך את תסבולת הכלונסאות בדרגת אמינות גבוהה ובאותה העת לקבוע את איכות הביצוע של הכלונס ושלמותו ולפיכך לבצע תכנון אלטרנטיבי, להגיע לאופטימיזציה בשיטת הביצוע ולהפחית את עלויות הביסוס.

## תיאור האתרים ותנאי הקרקע

האתר בקרית גת ממוקם בשכונה במרכז העיר שהמבנים שבה היו מיועדים להריסה. האתר בקרית ביאליק נמצא ממזרח לכביש עוקף קרית, על שטחים חקלאיים שהיו שייכים לקיבוץ אפק. באתר מבוצעות עבודות תשתית נרחבות לפיתוח תשתיות השכונה. את תכנון הביסוס וסקר הקרקע בשני הפרויקטים ביצע משרד **יועץ הקרקע אינג' זליו דיאמנדי**. סקר הקרקע כלל קידוחי ניסיון, בדיקות חוזק בשדה ובדיקות מעבדה. בשני האתרים תנאי הקרקע כוללים שכבת חרסית עליונה מפני השטח ועד לעומק של 1 מטר עד 4 מ', ומתחתיה שכבת סלע בחוזק בינוני עד קשה. בקרית ביאליק הסלע הוא כורכרי ובקרית גת קרטון וחוויר. עומק מי התהום בקרית ביאליק משתנה בין המגרשים כתלות ברום פני הקרקע. בחלק מהמגרשים נמצאו מים בעומק של 8-9 מ', ובחלק אחר כ-2 מ' מפני הקרקע. בקרית גת עומק מי התהום כ-20 מ'.

## תכנית הביסוס המקורית

שכבת החרסית בשני האתרים בעלת פוטנציאל לשינוי נפח כתוצאה משינוי תכולת רטיבות ולכן שיטת הביסוס שנקבעה היא כלונסאות קדוחים ויצוקים באתר. התכנון הקונסטרוקטיבי של פרויקט מגדלי סמדר נעשה על ידי **חברת גבריאל טרכטנברג מהנדסים** בע"מ, אשר תיכננה גם את רוב המבנים בפרויקט נאות אפק בקרית ביאליק. טווח העומסים בבניינים הגבוהים נע בין 300 ל-1000 טון. תכניות הביסוס המקוריות כללו כלונסאות בקוטר 80-120 ס"מ ובאורך 15-25 מ'. עקב החשש מהתמוטטויות של דפנות הקידוח, הכלונסאות תוכננו בשיטת בנטוניט.

## תכנית ניסיונות העמסה

ביצוע ניסיונות העמסה מאפשר לבדוק את התאמת שיטות הביצוע השונות לתנאי האתר, להקטין את חוסר הוודאות לגבי חתך הקרקע ופרמטרי התכנון ולאפיין את תסבולת הכלונסאות באזורים השונים. המידע המתקבל מאפשר לתכנן את הביסוס בצורה אופטימלית – הנדסית וכלכלית – על פי נתונים ממשיים.



ניסיונות העמסה דינמיים להשגת אופטימיזציה וחיסכון בביסוס. חברת גיאודינמיקה

ניסיונות העמסה על כלונסאות נועדו להעריך את התסבולת ומידת השלמות של כלונסאות. הניסיונות מאפשרים לבצע אופטימיזציה של התכנון ההנדסי, לפתור בעיות בביצוע או שינויים בתכנון ולהפחית משמעותית את עלויות הביסוס. הנושא מוצג דרך שני פרויקטים השונים בגודלם ובאופיים. בהמשך לתיאור תנאי הקרקע, תכנית הביסוס המקורית ופירוט אופן ביצוע הניסיונות הדינמיים, מובאות התוצאות, המסקנות ודרכי יישום

## רקע כללי על הפרויקטים

**שכונת נאות אפק** היא שכונת מגורים חדשה וגדולה הנבנית במזרח קרית ביאליק. בשכונה ייבנו למעלה מ-4,500 יח"ד בבנייה רוויה במגדלים של עד 25 קומות. **חברת גיא & דורון לוי** מקימה בשכונה 16 בניינים בני שבעה עד 19 קומות, שברובם מתוכנן חניון תת-קרקעי. הבניינים פרוסים על שטח גדול מאוד בשישה מגרשים שונים. **פרויקט מגדלי סמדר** המוקם על ידי **קבוצת אפיק הירדן**, הוא **פרויקט פינוי-בינוי** ברובע הפרחים שבמרכז העיר קרית גת. בפרויקט ארבעה מגדלים בני 20 קומות מעל חניון תת-קרקעי.



איור 2: מתקן העמסה דינמית בזמן ניסיון

## תוצאות הניסיונות

לאחר ביצוע הניסיונות, גיאודינמיקה ניתחה את המדידות הדינמיות כדי לקבוע את מבנה הכלונס ושלמותו וביצעה שלושה סוגי אנליזות להעריך את התסבולות של הכלונסאות שנבדקו. האנליזות כללו ניתוח התאמת אותות, התאמת אנרגיה ותסבולת בשיטת Case. בשני הפרויקטים הניסיונות הסתיימו בהצלחה מלאה והתקבלו תוצאות אמינות שנבחנו בהיתרונותם. בקרית ביאליק התוצאות מראות שעקב שכבת סלע אמינה באיכות גבוהה (הקשה לאבחון בקידוחי הניסיון), תסבולת כל הכלונסאות הייתה גבוהה משמעותית מהמצופה (גם הכלונסאות שבוצעו בשיטת בנטונייט וגם הכלונסאות שבוצעו ביבש). בכלונסאות בקוטר 60, 70 ו-90 ס"מ התסבולות הגיעו לכ-1,700, 2,300 ו-3,500 טון בהרס בהתאמה. גם בקרית בהרס. בשני הפרויקטים מירב התסבולת התקבלה מחיכוך בשכבות הסלע כשהניתוחים מאפשרים את קבלת פירוס ההתנגדות לאורך הכלונס. ההתנגדות הגבוהה שהתקבלה בשכבות הסלע בכלונסאות בקרית גת הביאה להחלטה לבצע בדיקות נוספות על כלונסאות קצרים (בקוטר 100 ס"מ ובאורך של כ-12 מ' מתחתית חפירת המרתף) שלא יגיעו למי התהום ויבוצעו ב"בש". תוצאות הבדיקות ב"בש" הראו תסבולת גבוהות ואמינות של כ-950 טון בהרס. דוגמה לתוצאות ניתוח התאמת אותות עבור כלונס TP-2 בקרית ביאליק (כלונס בקוטר 90 ס"מ באורך 14.7 מ') מוצגת באיור מס' 3 עבור חבטה 3 שאיננה המקסימלית. לצד גלי הכוח והמהירות המדודים מוצגת ההתאמה בין הכוח המדוד לזה המחושב שהתקבל ממודל התנגדות הקרקע שנבנה עבור הכלונס. פירוס התנגדות הקרקע

◀ המשך בעמוד 20

חברת **גיאודינמיקה** ביצעה הערכה עצמאית של התנאים באתר, ובשיתוף פעולה עם יועץ הקרקע הוכנה תכנית ניסיונות לכל פרויקט. התכנית המקורית בקרית ביאליק כללה 14 ניסיונות על כלונסאות בעלי שלושה קטרים שונים - 60, 70 ו-90 ס"מ. אורך הכלונסאות נקבע לפי קריטריון חדירה לסלע. בקרית גת התכנית כללה שלושה ניסיונות בקוטר אחד של 90 ס"מ ובאורך של כ-30 מ'. מיקום הניסיונות נקבע בהתאם למיקום הבניינים והשוני בחתך הקרקע בין האזורים השונים בכל אתר. מטרה עיקרית ראשונית של תכנית הניסיון בשני הפרויקטים הייתה להקטין את קוטר ועומק הכלונסאות לאותם עומסים בלי הצורך לבצע שינויים של ממש בתכנון הקיים.

## בניית הכלונסאות, ההגבהות וההכנות לביצוע הניסיונות

ביצוע הכלונסאות שנבנו במיוחד למטרת הניסיונות נעשה בפיקוח צמוד של חברת גיאודינמיקה. במגרשים בקרית ביאליק שבהם היו מי התהום בעומק של כ-8-9 מ' מפני הקרקע, הממצאים הראו שיש סבירות גבוהה שדפנות הקידוח יישארו יציבות גם ללא שימוש בתמיסת בנטונייט. לפיכך התקבלה החלטה לעדכן את תכנית הניסיונות ולבדוק שישה כלונסאות נוספים שיבוצעו בשיטה ה"יבשה" להשוואה עם הכלונסאות שבוצעו עם תמיסת בנטונייט. באזור שבו מפלס מי התהום היה קרוב לפני הקרקע התגלו זרימות תת-קרקעיות והיה קושי רב בביצוע הכלונסאות עקב "ברירה" של בנטונייט ופחת גדול בבטון. באזור זה הוחלט לבצע את הכלונסאות באמצעות קייסינג (צינור מגן). גם בקרית ביאליק וגם בקרית גת, בניית הכלונסאות וביצוע הניסיונות נעשו לפני שבוצעה חפירה למרתפים. כדי שהבדיקות יתבצעו במצב שמדמה את הבניה בפועל, נעשה שימוש בשרוולי פלדה בחלק העליון של הכלונסאות המאפשרים להקטין את החיכוך בחלק זה. החלק העליון של השרוול נחפר כדי לשחרר את מאמצי הקרקע ולאפשר את ביצוע הניסיונות באמצעות מתקן העמסה כנראה באיור 1.

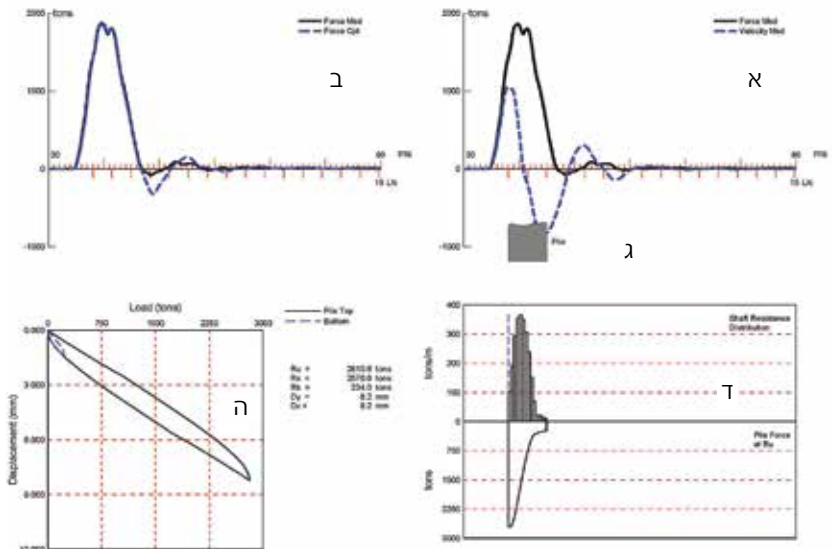


איור 1: הכנת כלונסאות לבדיקה דינמית

## ביצוע הניסיונות

ניסיונות העמסה דינמיים נעשים באמצעות מתקן העמסה מיוחד שמאפשר הפלת משקולת על הכלונס בתהליך מבוקר כנראה באיור 2. המתקן שתוכנן ונבנה על ידי **גיאודינמיקה** משתמש במערכת הידראולית ומאפשר שליטה במסת ההפלה וגובה הנפילה. הבדיקות מבוצעות בהתאם לתקן והן דורשות סימולציה מוקדמת, שליטה במתקן ההקשה ומדידות סימולטניות של תאוצות ועיבורים בהיקף ההגבהה בראש הכלונס. בשני הפרויקטים הכלונסאות נבדקו בהעמסה הדרגתית עד למאמצי הרס. ביצוע הניסיונות בקרית גת על שלושת הכלונסאות ארך יום אחד, ובקרית ביאליק ארכו הניסיונות על 22 הכלונסאות שבעה ימים סך-הכול.

משלוש ותלוי בתנאי האתר, הערכת פרמטרי הקרקע, דרך החישוב וביצוע הכלונסאות. כאשר החישובים מבוססים על ניסיונות העמסה באתר בפועל, ניתן להקטין את מקדם הביטחון עד ל-2 על פי התקן. ברוב המקרים פוטנציאל חיסכון ישיר של כ-30% ויותר מעלות הביסוס הכלולת הוא בסבירות גבוהה. החיסכון הישיר נמדד על פי רוב בנפח הכלונסאות לאחר הניסיונות בהשוואה לנפח הכלונסאות בתכנון המקורי עבור אותו עומס תכנוני, כלומר החיסכון מתבטא בהקטנת קוטר ועומק הכלונסאות עבור עומסים זהים נוסף לחיסכון בשינוי של שיטת הביצוע (לדוגמה מבטונייט ליבש או מאלמנטים סלריים לכלונסאות). מעבר לחיסכון הישיר יכול להתקבל חיסכון נוסף בעקבות קיצור כלובי הזיון, ביטול ראשי כלונסאות, קיצור לוחות זמנים וכו'. ניסוי העמסה דינמי הוא זול ומהיר בהשוואה לניסיון סטטי ולכן מתאפשר לבצע מספר רב יחסית של ניסיונות בעלות חלקית ביחס לניסיון סטטי בודד. בשני הפרויקטים הנדונים הנחיות הביסוס המעודכנות של משרד יועץ הקרקע זלוי דיאמנדי הביאו לחיסכון של כ-50% מעלות הביסוס.



איור 3: תוצאות ניתוח התאמת אותות כלונס TP-2 חבטה 3/5 - א) אותות מהירות וכח מדודים. ב) אותות כח מחושב מול כח מדוד. ג) מבנה הכלונס. ד) פירוס כחות ההתנגדות עם העומק. ה) יחסי עומס תזוזה בראש ובתחתית.

### סיכום ומסקנות

ניסיונות העמסה דינמיים מאפשרים בזמן קצר ובציוד כלכלי הערכה של תסבולת הכלונסאות הצפויה באתר. אמינות הניסיונות מוכחת, מעוגנת בתקינה ומקובלת בעולם כולו. ביצוע הניסיונות צריך להתבצע ברמה מקצועית גבוהה ולהיות מגובה בהצדקה כלכלית ו/או הנדסית. בפרויקטים גדולים מאוד, כדוגמת הפרויקט של חברת גיא & דורון לוי בנאות אפק, ההצדקה הכלכלית וההנדסית לביצוע ניסיונות העמסה ברורה גם מתוך הצורך להתמודד עם שטחים גדולים שבהם טכניקת בניית הכלונסאות נבדקת לפני הביצוע בפועל. גם בפרויקטים באזור מצומצם, כדוגמת פרויקט מגדלי סמדר (או בהיקפים קטנים ממנו), הניסיונות אם מוצדקים כלכלית והנדסית, מביאים לחיסכון משמעותי בעלויות, פישוט וחיסכון בביצוע ובקיצור של לוחות הזמנים.

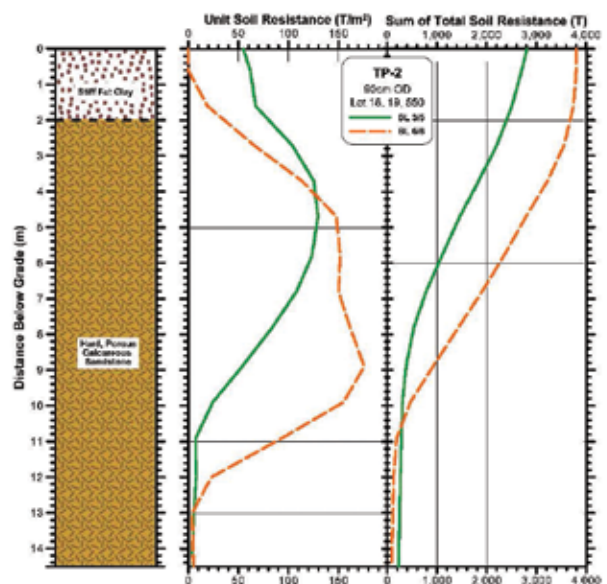
### מראי מקום

- דיאמנדי (2016) בדיקות קרקע וייעוץ לביסוס קרית ביאליק, מתחם 16, מגרשים 18, 19, 550, 12, 14.
- דיאמנדי (2015) בדיקות קרקע וייעוץ לביסוס, מתחם היסמין - קרית גת.
- Paikowsky, S. et al.. (2004). NCHRP Report 507 Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Deep Foundations, Project NCHRP 24-17, TRB, Washington, DC, pp. 134,
- Paikowsky, S.G. (2013). "Dynamic Load Testing of Drilled Deep Foundations", Keynote lecture in the Swiss Geotechnic Annual Meeting, Freiburg, Switzerland, 2 May, Vol.166, pp.1-52.

**הערה והכרת תודה:** שיתוף הפעולה, רוח החדשנות והניהול של מר גיא לוי, אינג' רון זיו ואילן אפק מחברת גיא & דורון לוי ויאר עייני מאפיקי סמדר מוערכת ומודגשת. שיתוף הפעולה והנחיות יועץ הביסוס אינג' זלוי דיאמנדי היו מפתח להצלחת הפרויקטים.

**חברת גיאודינמיקה עוסקת בשירותי תכנון בהנדסת קרקע וביסוס ומתמחה בתכנון וביצוע ניסיונות העמסה, עבודות מימות, ניטור מערכות, קביעת חוסר ודאות ומחקר.**

של מודל זה לאורך הכולנס גם מוצג גרפית עם סיכום ההתנגדות כוללת של 2811 טון, מזה 2577 טון בחיכוך ו-234 טון בהתנגדות קצה. גם הערכת שלמות הכולנס מוצגת גרפית באיור 3. איור 4 מציג את הנתגדות הקרקע לאורך הכולנס עם התפתחותה לנוכח גידול ההעמסה מחבטה 3/5 לחבטה 6/8 בה נוצר גידול בהתנגדות מ-2,577 ל-3,800 טון כשההתנגדות עוברת לחלק היותר תחתון בכלונס אך עדיין לא משמעותית לתחתית. איור 4 מדגים את המידע המתקבל ובאמצעותו האפשרות לתכנון עדכני.



איור 4: פירוס התנגדות המאמצים והכחות עם העומק עם גידול בהעמסה

### המשמעות הכלכלית של ביצוע הניסיונות

על פי התקן הישראלי לביסוס (ת"י 940) יש להשתמש במקדם ביטחון השווה ל-3 לחישוב התסבולת של יסודות. מקדם הביטחון הוא היחס שבין העומס בהרס לעומס המתוכנן על היסוד. במציאות בארץ ובעולם, בגלל חוסר הוודאות הנ"ל מקדם הביטחון בפועל גדול בהרבה