



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

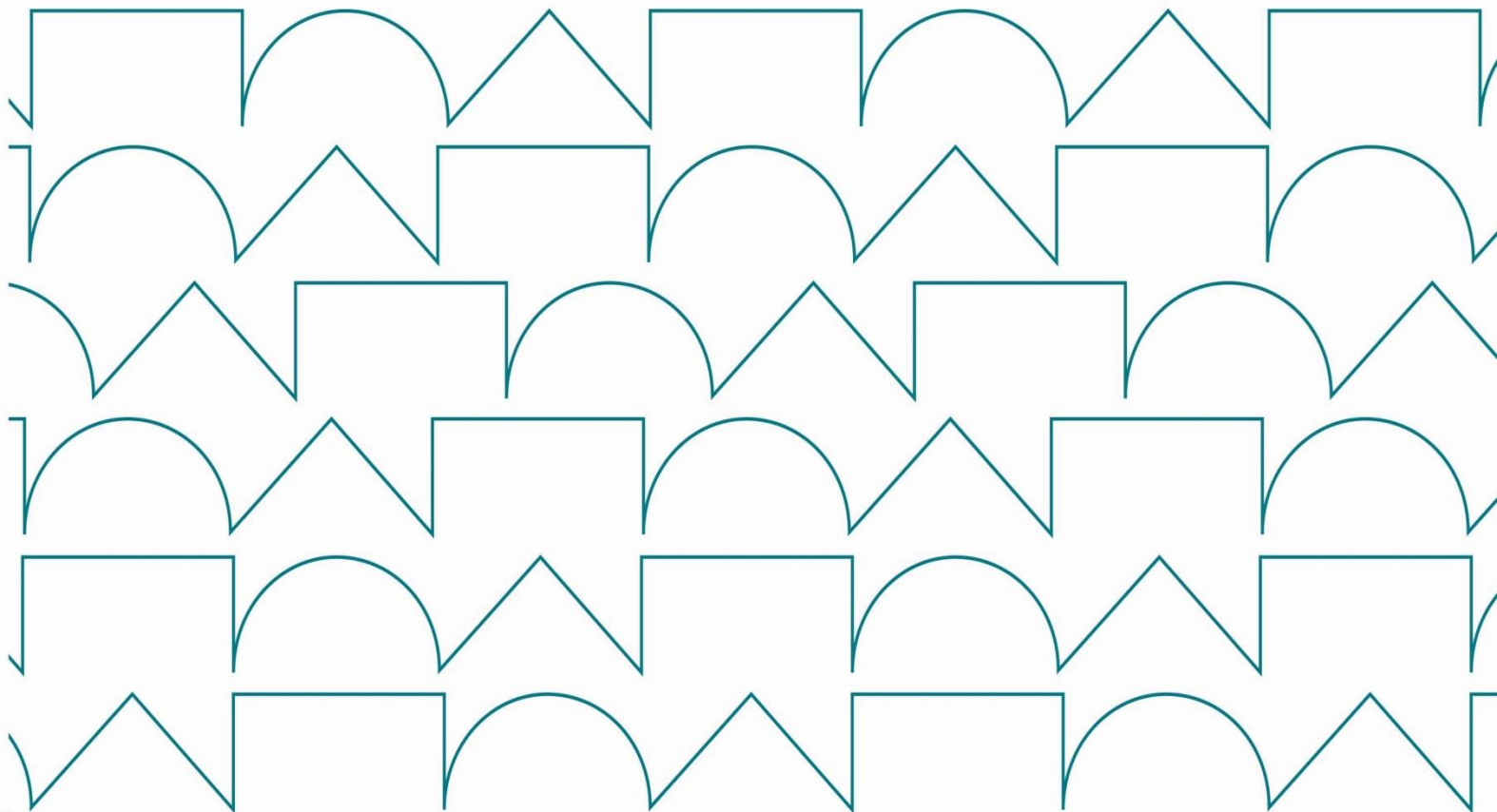


הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה

מידול תלת-ממדי של אתרי בנייה לניהול בטיחות עבודת עגורני צריח

שגיא פילין אביעד שפירא עמית ויקנודל





מיסודם של Founded by

משרד הבינוי והשיכון MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING

הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית Faculty of Civil & Environmental Engineering

NATIONAL המכון
BUILDING הלאומי
RESEARCH לחקר
INSTITUTE הבנייה

2012937

מידול תלת-ממדי של אתרי בנייה לניהול בטיחות עבודת עגורני צריח

פרופ"ח שגיא פילין פרופ"ח אביעד שפירא אינג' עמית ויקנודל

מלווי מחקר: אינג' ש. ברזני י. ליסינגר מ. ענבר ד"ר ח. ארגמן אינג' א. קורן

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון
חוזה מס' 4500386314

Copyright © 2011 by S. Filin, A. Shapira, A. Wicnudel
Israel Ministry of Construction and Housing, and
Technion Research and Development Foundation, Ltd., Haifa

למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקרים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון מכון טכנולוגי לישראל אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדוח או לצד ג' כלשהו, עקב דוח זה או בהקשר אליו, לרבות בשל יישום האמור בו.

הבעת תודה

החוקרים מודים בזאת לכל הגורמים שהיו מעורבים במחקר ובהכנת דוח זה ותרמו להצלחתם :

- לחברת דניה סיבוס וצוות אתר הבנייה "סקאי עיר ימים" בנתניה-פולג, ובפרט למירון ענבר, שלומי הירשהורן, דוד נורמן, אודי דרעי, ופריד זאיד, על העמדת האתר לרשותנו לצורך ביצוע המעקבים והמדידות מתא העגורנאי וביצוע סריקות הלייזר הקרקעיות.
- לאברי ברנס, משתלם לתואר שני, על ביצוע המעקבים והמדידות הידניות מתא העגורנאי, ארגון התוצאות בפלטפורמת אקסל, ושיתופנו בתובנות שונות שהגיע אליהן, כמו גם ההדמיות המועילות להמחשת הבעייתיות ב"הנפות עוורות". פרק 5 בדוח זה מבוסס במלואו על תרומתו של אברי למחקר.
- לראומה ערב, משתלמת לתואר שני, על הסיוע בעריכת סקר הספרות.
- ולבסוף, לחברי ועדת הליווי של משרד הבינוי והשיכון, שהכירו בחשיבות הנושא, נטלו חלק בישיבות הליווי ובהצגות הפרונטאליות של תוצאות שלבי המחקר, תמכו בהתקדמות המחקר, וזיהו את הפוטנציאל הגלום בממצאיו.

שגיא פילין ואביעד שפירא

חוה"מ פסח תשע"א, אפריל 2011

תוכן עניינים

1. תקציר..... 1

1. מבוא..... 3

1.1 רקע כללי ותאור הבעיה..... 3

1.2 מטרת המחקר..... 5

1.3 שיטת המחקר..... 6

1.4 שלבי הביצוע..... 7

1.5 ארגון הדוח..... 8

2. עבודת עגורני צריח: בטיחות ומגבלות ראייה..... 9

2.1 היקף השימוש בעגורני צריח..... 9

2.2 בטיחות עגורני צריח - כללי..... 9

2.3 מגבלות שדה הראייה..... 10

2.4 הנפות עוורות..... 14

2.5 פתרונות קיימים..... 15

2.5.1 אתתים..... 15

2.5.2 אמצעי עזר לראייה..... 16

2.6 סיכום..... 17

3. סורקי לייזר בבנייה..... 18

3.1 כללי..... 18

3.1.1 ענן נקודות..... 18

3.1.2 עיגון (רגיסטרציה)..... 19

3.2 שימוש בסורקי לייזר באתרי בנייה..... 20

3.2.1 פיקוח וניהול בנייה..... 21

3.2.2 מדידת דפורמציות במבנים..... 26

3.2.3 איתור בזמן אמת לצורך בטיחות בעבודה..... 32

3.2.4 שימוש בנתוני לייזר לצורך עבודות פיתוח..... 33

3.2.5 שימוש בנתוני לייזר לצורך עבודות חפירה..... 35

3.2.6 ניטור תזוזות קרקע בעת עבודות חפירה..... 36

3.2.7 התאמת סורקי לייזר ליישומים ייחודיים..... 41

3.3 חיישנים אחרים באתרי בנייה..... 48

3.3.1 מד טווח..... 48

50	3.3.2 מצלמות טווחים
52	3.3.3 חיישני אולטרא סאונד
53	3.4 סיכום
54	4. מתודולוגיה
54	4.1 אפיון אתר הניסוי
55	4.2 בדיקת אתרי ניסוי אפשריים
56	4.3 אתר הניסוי הנבחר
62	4.4 תאור תהליך סריקת הלייזר
62	4.4.1 כללי
63	4.4.2 קביעת מיקום עמדת מכשיר
66	4.5 תצפית מתא העגורנאי
69	5. מדידות ידניות
69	5.1 מטרות ויעדי העבודה
69	5.2 חלוקת האתר לאזורי עניין
70	5.3 מושגי יסוד בביצוע המדידות
71	5.4 מדידות
74	5.5 מסקנות
74	5.5.1 הנפות יוצאות דופן
75	5.5.2 תפקיד העגורנאי
75	5.5.3 תקשורת בין העוסקים במלאכה
76	5.5.4 תכנון האתר במוכוונות ליעילות העגורן
77	5.5.5 הנפות בשעות החשכה
78	5.5.6 השפעת היחס בין גובה הבניין לגובה העגורן על כמות השטח הנסתר
79	5.5.7 עבודה בשני עגורנים במקביל
81	6. סריקות הלייזר
81	6.1 סריקה מכל עמדה
82	6.2 עיגון
85	6.3 מידול שדה הראייה של העגורנאי
88	6.3.1 פתרון גיאומטרי
88	6.3.1.1 חילוץ קווים ישרים בעזרת התמרת Hough
91	6.3.1.2 ייצוג המרחב וסיווג
97	6.3.2 זיהוי אזורים בלתי נראים על בסיס מידול שדה הראייה של העגורנאי
97	6.3.2.1 הייצוג הפנוראמי
99	6.3.2.2 סיווג נקודות כנראות/נסתרות

101	7. תוצאות ואינטגרציה
101	7.1 בניית מודל המתאר את אתר הבנייה
101	7.1.1 עיגון
102	7.1.2 הטלת ענן הנקודות על מישור
103	7.1.3 חילוץ קווי מעטפת הבניין
105	7.1.4 ייצוג המרחב וסיווגו
107	7.2 השוואה ואימות מידע המתקבל מסריקות הלייזר בעזרת המדידות הידניות
107	7.2.1 השוואת הנפח הנסתר הכולל
108	7.2.2 השוואה ואימות החלק העיורר בהנפות בודדות
111	8. סיכום ומסקנות
111	8.1 סיכום
111	8.2 מסקנות
112	8.3 המשך מחקר
113	מראי מקום
123	נספחים
123	נספח א – טבלאות המדידה

רשימת טבלאות

58	טבלה 4-1 התאמת האתר הנבחר לאפיון
109	טבלה 7-1 תאחוז הזמן העיורר של חמש תצפיות

רשימת איורים

- איור 1-2 תצורות של עגורני בנייה ומיקום העגורנאי 11
- איור 2-2 מגבלות ראייה של העגורנאי בעגורן צריח..... 13
- איור 3-1 דוגמא לסטיות שנמצאו בין המודל המתוכנן לסרוק 23
- איור 3-2 תוצאות הניסוי המקדים..... 26
- איור 3-3 דוגמא למיקום נקודות הסריקה בשש זוויות הגובה השונות 27
- איור 3-4 הצבת הניסוי 28
- איור 3-5 מיקומי הסורק לפני ואחרי ניסוי ההעמסה..... 28
- איור 3-6 מיפוי סדקים בקורה המורכבת בעזרת סורק לייזר..... 30
- איור 3-7 סטיות בקירות הדרומי והצפוני לפני ואחרי מבחן רעידת האדמה 31
- איור 3-8 השוואה בין החתכים שנעשו מתוך נתוני סורק קצר-טווח וסורק ארוך-טווח..... 31
- איור 3-9 תאור השטחים המתים בגובה הקרקע בעבור שני כלים שונים 32
- איור 3-10 איתור נזקים במדרכות: תוצאות ההקבצה לפי מאפיינים שונים בנתונים הסינתטיים . 33
- איור 3-11 איתור נזקים במדרכות: תוצאות ההקבצה לפי מאפיינים שונים בנתונים האמיתיים .. 34
- איור 3-12 חתך של הקרונית במעבדה עם סורקי לייזר..... 34
- איור 3-13 תוכנית המדידה והסריקה של אתר החפירה 38
- איור 3-14 מודלי שטח מותמרים ומועברים למודלי אלמנטים סופיים..... 38
- איור 3-15 מערכת ה-SelfSim: מתווה תהליך הלמידה העצמאית של הסימולציה 39
- איור 3-16 גיאומטריית פני השטח בתאריכי הסריקה השונים 39
- איור 3-17 תהליך מציאת הפרמטרים לצורך כיול מערכת ה-selfSim..... 40
- איור 3-18 השוואה בין מדידות שנעשו באוניברסיטת Northwestern ע"י Holman והתוצאות החזויות שנמצאו בעזרת SelfSim..... 41
- איור 3-19 סורק הלייזר מוצב מעל הבור..... 42
- איור 3-20 שלושת השלבים הראשונים של התהליך המוצע..... 42
- איור 3-21 סורק הלייזר התלת-ממדי המותקן בתא הלחץ הפניאומאטי 43
- איור 3-22 דוגמאות לשני הסוגים של סורקי לייזר..... 44
- איור 3-23 מערכת ניידת Responder והפעלתה..... 45
- איור 3-24 ציוד השדה לסריקות הצוקים..... 47
- איור 3-25 סורק הלייזר על המגלשה, מותאם למעבר בצינורות שונים..... 48
- איור 3-26 הבדלי דיוק במודל כתלות במספרי ה-convex hull שנבחרו..... 49
- איור 3-28 מיום חיישני הלייזר על העגורן..... 50
- איור 3-29 תרשים עיבוד נתוני הלייזר והאפשרויות השונות ליישום כל שלב..... 52
- איור 4-1 אתר "רוטשילד 30"..... 56
- איור 4-2 תאור חלוקת הקומות..... 57
- איור 4-3 אתר הניסוי: הבניין ועגורן הניסוי..... 58

59	איור 4-4 אתר הניסוי : שני עגורנים חופפים
60	איור 4-5 אתר הניסוי : פוטנציאל להנפות עוורות
60	איור 4-6 אתר הניסוי : תרחיש טיפוסי להנפה מהקרקע
61	איור 4-7 אתר הניסוי : תרחיש טיפוסי להנפה בקומה
61	איור 4-8 אתר הניסוי : מצלמה כעזר ראייה
62	איור 4-9 אתר הניסוי : צג המצלמה בתא העגורנאי
64	איור 4-10 סורק הלייזר Leica ScanStation 2
64	איור 4-11 סורק הלייזר מול הבניין בזמן מדידה
65	איור 4-12 סכימה המתארת את מהלך הסריקה
65	איור 4-13 ספירות (כדורים) המשמשות לעיגון סריקות הלייזר
67	איור 4-14 טיפוס על העגורן
67	איור 4-15 תצפית מתא העגורן
68	איור 4-16 משאית הבטון המובא ממוקמת כך שתהיה בשדה הראייה של העגורנאי
68	איור 4-17 תיעוד האתר ואזורי ההנפה מזרוע העגורן לצורך המחקר
70	איור 5-1 אתר הניסוי : חלוקה לשטחים
72	איור 5-2 טבלת מדידה בצורתה הגולמית
73	איור 5-3 טבלת מדידה לאחר השלמת יום מדידות בשטח
74	איור 5-4 הנפה ארוכה יותר על מנת להימנע מהנפה בשטח מת
75	איור 5-5 הנפה ארוכה יותר על מנת להימנע ממעבר בשטח חופף לפעילות העגורן השני
77	איור 5-6 הצללת אזור הטפסות באתר ע"י הבניין עצמו משעות הצהריים
78	איור 5-7 פנסי העגורן בשעות החשכה
78	איור 5-8 עבודת העגורנים בזמן המעבר בין יום ללילה
79	איור 5-9 השתנות האזור המת כתלות בגובה היחסי בין הבניין לעגורן
80	איור 5-10 עגורן הניסוי יוצק בטון בשטחו של העגורן השני
81	איור 6-1 ענני הנקודות מכל סריקה במערכת מקומית שונה
82	איור 6-2 ספירה על חצובה סרוקה ברזולוציה גבוהה
83	איור 6-3 מציאת הספירה מתוך הנקודות הרלוונטיות
84	איור 6-4 תוצאות העיגון
86	איור 6-5 ענן הנקודות המתקבל מחזית אחת של הבניין
86	איור 6-6 תקריב על ענן הנקודות. נקודות הנמצאות על מעטפת הבניין ובתוכו
87	איור 6-7 תקריב על ענן הנקודות. צפיפות משתנה בציר האנכי לעומת הציר האופקי
87	איור 6-8 הסתרות בענן הנקודות הנגרמות מחסימת קו הראייה בין הסורק לאובייקט
89	איור 6-9 גבולות המבנה לאחר זיהוי הספים
90	איור 6-10 שיאים חזקים – איתור שיא ראשון
90	איור 6-11 שיאים חזקים – איתור שיא שני
91	איור 6-12 שיאים חזקים – איתור שיא אחרון
92	איור 6-13 מידול הבניין לפי חתימתו הקרקעית ומידול העגורן לפי מיקום מרכזו וגובהו

93	איור 6-14 סיווג ווקסלים ע"פ מספר החיתוכים עם מישורי הבניין
93	איור 6-15 מרחב העבודה ממבט על. הווקסלים הנבחרים בתוך מעטפת העבודה של העגורן
94	איור 6-16 מרחב העבודה ממבט צד
96	איור 6-17 אזורים נראים ונסתרים – מבט על
96	איור 6-18 אזורים נראים ונסתרים – מבט קדמי ומבט צד
97	איור 6-19 אזורים נראים ונסתרים – מבטים שונים
98	איור 6-20 סידור ענן נקודות תלת-ממדי כתמונת טווחים פנוראמית
99	איור 6-21 סריקה בייצוג פנוראמי
102	איור 7-1 ענן הנקודות מארבע הסריקות לאחר העיגון
103	איור 7-2 הטלת ענן הנקודות על מישור XY
103	איור 7-3 השיאים שנלקחו בחשבון כקווים
104	איור 7-4 הצגת הקווים על גבי תמונת הטלת הנקודות
104	איור 7-5 סינון קווים
105	איור 7-6 השלמת קווים חסרים
105	איור 7-7 אזורים נראים ונסתרים – מבט על
106	איור 7-8 אזורים נראים ונסתרים – מבט קדמי ומבט צד
107	איור 7-9 אזורים נראים ונסתרים – מבטים שונים
108	איור 7-10 חלוקת המרחב לווקסלים רלוונטיים
110	איור 7-11 מטען המונף מאזור מסוים בקרקע לאזור מסוים בקומה

תקציר

עגורני צריח מהווים את המרכיב המרכזי של מערך הייצור באתרי הבנייה של זמננו. כמעט בכל אתר בנייה של מבנה ציבור, מסחר, תעשייה, משרדים ומגורים ניתן למצוא עגורן ואף מספר עגורני צריח. לעגורני צריח השפעה גדולה על בטיחות העבודה באתר לא רק בגין השימוש הנרחב בהם אלא מעצם העבודה עמם, המגלמת סכנה בטיחותית גדולה. עבודת העגורן מתבטאת בהנפת מטענים בכל המרחב התחום על ידי מעטפת העבודה שלו, כולל מעל ראשי העובדים באתר. מכאן גם הפוטנציאל הגבוה להגברת בטיחות העבודה באתר על ידי התמקדות במפגעים האופייניים לסביבת העבודה של העגורן.

בצד השיטות המסורתיות, יש כיום בעולם מגמה לרתימה של טכנולוגיות מתקדמות למניעת אירועים בטיחותיים. אחת מאלה הינה סריקות לייזר, טכנולוגיה חדשה יחסית בעלת יתרונות משמעותיים בעבור מדידות בתלת-ממד. סורק הלייזר מספק תיאור מהיר וישיר של גיאומטריה תלת-ממדית, אשר אינו תלוי בתנאי תאורה ומזג אוויר, הנרכש בצורה אוטומטית. בשנים האחרונות הופכות מערכות מיפוי מבוסס-לייזר לרווחות יותר ויותר; בין היתר גדל באופן טבעי השימוש בסורקי לייזר קרקעיים למידול תלת-ממדי של אתרי בנייה ולסיווג ענן הנקודות לאובייקטים שונים. קיימים שימושים רבים של סורקי לייזר בתחום הבנייה, בעיקר בתחום הפיקוח וניהול הבנייה ובמדידת דפורמציות במבנים. יחד עם זאת, סקר ספרות מקיף שנערך במסגרת מחקר זה לא איתר מחקר העוסק באופן ספציפי בעגורנים.

מבין בעיות הבטיחות הרבות הכרוכות בעבודת עגורנים, המחקר הנוכחי מבקש לטפל במגבלות שדה הראייה של העגורנאי. למגבלות אלה משמעות בטיחותיות שלא ניתן להגזים בהריפותן. הפתרון המקובל לא השתנה עשרות שנים והינו שימוש באתתים. בשנים האחרונות נוספו אמצעי ראיית עזר שמבוססים על מצלמה המותקנת על העגורן והמשרדת לתא העגורנאי. לפתרונות אלה מגבלות שונות, ובכל מקרה הפעלתם אינה מושכלת, או תוצאה של תכנון מקדים כלשהו. הקושי המרכזי נובע מחוסר היכולת לאמוד כמותית את שדה הראייה באתר נתון. אומדן כזה יאפשר לדעת מה מידת ההסתרה של אזורי העבודה במהלך עבודת העגורן.

כיום לא קיים מודל המאפשר להעריך באופן כמותי את שיעור הזמן בו עבודת העגורנאי סובלת ממגבלות הראייה שלו. בפרט אמור הדבר לגבי "הנפות עוורות" (הנפות המתבצעות כאשר קו הראייה של העגורנאי מופרע), שהן תוצאה של יחסים גיאומטריים. מטרתה הסופית של תוכנית המחקר הכוללת במסגרתה נערך מחקר גישוש זה הינה פיתוח גישה לתיאור אתר הבנייה מבוססת טכנולוגיות מתקדמות של סריקות לייזר, ובעזרתה מיפוי שדה הראייה של מפעיל עגורן הצריח באתר הבנייה. תיאור זה יהווה בסיס לניתוח והערכה כמותית של נקודות תורפה בטיחותיות בשדה הראייה, ובעיקר הנפות עוורות.

המחקר נחלק לשני חלקים עיקריים: מדידות ידניות וסריקות לייזר. המטרה העיקרית של המדידות הידניות היא לאתר גורמים המשפיעים על מחזורי עבודתו של עגורן הצריח ולבחון כמותית את פרקי זמן עבודתו בשטח מת בסביבת עבודה טיפוסית. נתוני סריקות הלייזר

מאפשרים ניתוח שדה הראייה ותחקור המרחב במונחים של הפעלה בודדת. כלים מעין אלו יכולים לספק חיווי לגבי אופי תפעול ההנפות באתר הבנייה.

המחקר מציג פיתוח שני מודלים המספקים אמצעים משלימים לצורך עיבוד המידע. האחד מבוסס על מידול אתר הבנייה על פי הגיאומטריה המרחבית שבו בעוד שהשני מבוסס על יצירת מרחב דו-ממדי המתאר את שדה הראייה מנקודת המבט של העגורנאי ומאפשר תחקור נקודה במרחב אל מול מרחב זה. המחקר הראה התאמה גבוהה בין המדידות הידניות לבין התוצאות המתקבלות מתוך תחקור המודל הגיאומטרי שפותח מתוך סריקת הלייזר. ניתן, אם כן, להסיק כי שימוש במודלים שפותחו, בשלב תכנון האתר, יכול לייעל את עבודת העגורן ולהגביר את בטיחותה, בין אם דרך בחירה מיטבית של שטחי התארגנות ואחסון חומרים ואלמנטים להנפה, ובין אם דרך קביעת מיקום העגורן עצמו להפחתת כמות ההנפות העוורות, תוך תכנון לשימוש יעיל יותר באתרים במהלך הבנייה.

1. מבוא

1.1 רקע כללי ותאור הבעיה

עגורני צריח מהווים את הציר סביבו סובב כל מערך הייצור באתרי הבנייה של זמננו. אין כיום כמעט אתר בנייה של מבנה ציבור, מסחר, תעשייה, ומשרדים ללא עגורן אחד או יותר; בנייני מגורים החל משלוש-ארבע קומות ומעלה מוקמים תמיד בעזרת עגורנים. במדינות אירופה המערבית, עגורני בנייה קטנים ובינוניים המשרתים הקמה של מבנים חד- ודו-קומתיים הינם מראה שכיח. ישראל מייצגת כבר דשנים רבות תרבות מפותחת של שימוש בעגורני צריח, ומספרם, הנאמד כיום בכ-1,000 עד 1,200, הוא מהגבוהים בעולם לנפש (Shapira et al. 2007).

לעגורני צריח השפעה גדולה על בטיחות העבודה באתר לא רק בגין השימוש הנרחב בהם אלא מעצם העבודה עמם, המגלמת סכנה בטיחותית גדולה. השימוש בעגורן מגביר עוד יותר את פוטנציאל הסיכון באתר הבנייה שמקובל לראות בו סביבת עבודה מסוכנת, בגין האפיונים שלו (כל פרויקט בפני עצמו ולא ניתן להטמיע נהלים כמו בתעשייה; צוותי עבודה מתחלפים תדיר; חשיפה למזג אוויר; הימצאות סמוכה של אנשים וציוד כבד; גובה רב; ועוד). מכאן גם הפוטנציאל הגבוה להגברת בטיחות העבודה באתר ע"י התמקדות במפגעים האופייניים לסביבת העבודה של העגורן. עבודת העגורן מתבטאת בהנפת מטענים בכל המרחב התחום ע"י מעטפת העבודה שלו, כולל מעל ראשי העובדים באתר. האנרגיה הרבה האצורה בעגורן ודרגות החופש הרבות של המטען המונף הופכים כל מגע בלתי מתוכנן בין המטען או חלק מחלקי העגורן לבין עובדים או עצמים לתאונה קטלנית (או בעלת נזק כספי גבוה) בפוטנציה. בשגרת עבודה המאופיינת בדרך כלל ע"י צפיפות, אילוצי זמן ותקציב, כוח אדם בלתי מיומן, ותרבות לקויה של הקפדה על משמעת וכללי בטיחות נאותים, אין תמה שמתרחשות תאונות רבות ובעיקר מספר רב של מקרי "כמעט תאונה", שכמעט אף פעם אינם מדווחים, בהם מעורבים עגורנים.

המחקר מבקש לטפל באחת הבעיות המרכזיות של עבודת העגורנאי בעגורני צריח, והיא מגבלות שדה הראייה שלו. למגבלות אלה משמעויות בטיחותיות שלא ניתן להגזים בחריפותן, שהרי ממד הראייה והשליטה הויזואלית על כל שטח העבודה, לרבות אזורי הטעינה, אזורי הפריקה, ומסלולי ההסעה, מהווים את התנאי הבסיסי לעבודה בטיחותית. כאשר מוגבל שדה הראייה (כגון בגין מרחק רב או תאורה בלתי מספקת) או נחסם כליל (בגין עבודה באזור מוסתר מעיני העגורנאי), נפגמת יכולתו של העגורנאי לבצע את עבודתו באופן בטיחותי מלא; האטת קצב עבודתו חושפת אותו ללחצים סביבתיים (כגון ממנהל האתר או מנהל העבודה) לשוב לעבוד בקצב "נורמלי" וכך נפגעת הבטיחות עוד יותר. בנוסף לכך, נפגעת (או אף אובדת) יכולתו לפקח על קשירה נאותה של המטען, על כל המשתמע מכך מבחינת הסיכון הבטיחותי באתר. הפתרון המקובל (וגם מעוגן בתקנות הבטיחות) לא השתנה עשרות שנים, למעשה מאז צצו עגורנים לראשונה, והינו שימוש באתנים; בשנים האחרונות נוספו אמצעי ראיית עזר שמבוססים על מצלמה המותקנת על העגורן והמשרדת לתא העגורנאי. לפתרונות אלה מגבלות שונות, ובכל מקרה הפעלתם אינה מושכלת, או

תוצאה של תכנון מקדים כלשהו. למרות היות השימוש באתרים פתרון רווח זוהי פעולה עתירת כוח אדם, עלותה גבוהה, ודורשת בפועל הצבת מספר אתרים במספר מקומות בו-זמנית בשל אופי השרות שמספק העגורן באתר. בהיבטי בטיחות ויעילות ביצוע, קיימת לפיכך תלות מכרעת בהכשרת האתת (שבמספר מקרים לא מבוטל הינה בלתי נאותה, עד כדי חוסר הכשרה בכלל); התמודדות עם כשלי תקשורת בשל מחסומי שפה; והתמודדות עם הבעיה האינהרנטית הנובעת מחלוקת האחריות להנפה בין העגורנאי לאתת. מחקר שאיתר וניתח גורמי סיכון בטיחותי מרכזיים באתרי בנייה עם עגורני צריח (שפירא ולחין 2004) הראה כי ניסיונו של האתת הינו אחד הגורמים המרכזיים המשפיעים על הסיכוי להתרחשות תאונה; מרבית המרואיינים אף ביקרו בחריפות את ההפקרות, כלשונם, השוררת בתחום זה באתרי בנייה ותלו בה את האשמה לחלק ניכר מהתאונות ו"כמעט תאונות" המתרחשות באתרים.

בהשוואה לעגורן מתנייע, מיקום העגורנאי במרומי עגורן הצריח מקנה לו שדה ראייה רחב על אזור העבודה. חרף זאת, אין מיקום זה נטול מגבלות. השלכותיהן של מגבלות שדה הראייה בעגורן צריח הינן בעלת משמעות רחבה ועמוקה על בטיחות העבודה (Shapira et al. 2008). הן כוללות: (1) מרחק גדול של אזור הטעינה ו/או אזור הפריקה מעיני העגורנאי המקשה את הדיוק בעבודה; (2) פריקה ו/או טעינה בזווית ראייה בלתי נוחה, בייחוד זווית ראייה "שטוחה", שבה המרחק האנכי בין עיני העגורנאי לנקודת הפריקה או הטעינה הינו קטן, בעוד שהמרחק האופקי בין שני אלו גדול יחסית; (3) עבודה בתנאי תאורה גרועים, לדוגמא עבודה טרם זריחת השמש, בשעות בין הערביים או ולעיתים עבודה אל תוך הלילה; (4) מעבר בין אזורים מוארים לאזורים מוצלים, דוגמת הנפות בתוך פירים חשוכים של מעליות וחדרי מדרגות, היוצרת מצב בו העגורנאי כמעט ואינו רואה דבר, למשך כמה שניות; ובעיקר (5) הסתרת זירת העבודה – נקודת הטעינה, נקודת הפריקה, מסלול ההסעה – בחלקה או במלואה מעיני העגורנאי כאשר ברוב המקרים המבנה עצמו הוא זה שמסתיר מעיני העגורנאי את זירת העבודה, ומחייב ביצוע "הנפה עיוורת". במחקר שנזכר לעיל של שפירא ולחין (2004) נמצא שלהנפות עוורות השפעה רבה על הסיכוי להתרחשות תאונה.

הקושי המרכזי לנתח את הבעיה נובע מחוסר היכולת לאמוד כמותית את שדה הראייה באתר נתון. אומדן כזה יאפשר לדעת מה מידת ההסתרה של אזורי העבודה במהלך עבודת העגורן; כיצד משתנית ההסתרה עם התקדמות הבנייה והשינויים הגיאומטריים שעובר המבנה המוקם ועם הגבהת העגורן; באילו ממטלות ההנפה של העגורן תופסות מגבלות הראייה נתח רב יותר ממטלות הנפה אחרות; באיזו מידה מושפעות ממגבלות שדה הראייה הן הסביבה המיידית והן הסביבה הקרובה; ועוד שאלות שהתשובות עליהן אמורות לסייע בתכנון והקצאה של אמצעי המנע השונים.

לא קיים כיום כל מודל המאפשר "למדוד", או להעריך באופן כמותי (וודאי שלא מראש), את שיעור הזמן בו עבודת העגורנאי סובלת ממגבלות הראייה שלו. בפרט אמור הדבר לגבי הנפות עוורות, שהן תוצאה של יחסים גיאומטריים. מידע כזה, לו היה ברשות חברות הבנייה, היה מאפשר להן להקצות בצורה מושכלת וממוקדת את אותם המשאבים שהן כן מוכנות להשקיע

בשיפור בטיחות העבודה. יצירת זיקה בין תכנון התקדמות העבודה, מטלות ההנפה של העגורן, ואפיון שדה הראייה של העגורנאי יכולה לאפשר תכנון מוקדם ומדויק של דרישות לאתמים לאורך כל מהלך הביצוע: חסכון מצד אחד, ואפשרות השקעה ממוקדת בהכשרה נאותה מצד שני.

מורכבותם ואופיים הדינמי של אתרי בנייה אינם מאפשרים למעשה הערכה כמותית אנליטית או סימולטיבית של מידת החשיפה לסיכון בטיחותי זה. ככלל הבעיה המתוארת היא ארבע ממדית באופייה וכוללת את המרחב התלת-ממדי בו קיימים יחסים גיאומטריים מורכבים בין הצורה והמידות של המבנה, הפרטים המצויים באתר הבנייה וסביבתו, מיקום עיני העגורנאי, ואופי הפעילות. עם התקדמות הבנייה משתנים כל אלה. לו ניתן היה לתאר את כל אלה, ניתן היה ללמוד מכך רבות ולהסיק מסקנות שתאפשרנה לתכנן וליישם בצורה מיטבית את הקצאת המשאבים המוגבלים הקיימים לטובת הגברת הבטיחות באתר.

בעוד שתיאור מסוג זה לא היה אפשרי עד היום, בין אם בשל העדר טכנולוגיות הולמות, ובין אם בשל זמינותן הנמוכה של הטכנולוגיות בגין יחס עלות-תועלת גבוה, קיומן וזמינותן של הטכנולוגיות כיום מאפשרים קבלת תמונה מהימנה יותר של הסיכונים באתר הבנייה, ומטרת המחקר המוצע כאן היא לרתום אותן לטובת פתרון הבעיה. באופן ממוקד יותר מציע מחקר זה שימוש בטכנולוגיית לייזר, ובפרט סריקות לייזר קרקעיות לצורך תיאור תלת-ממדי של אתרי בנייה וסביבתם ולטובת יצירתה של התמונה התלת-ואף הארבע-ממדית כמתואר לעיל. זמינותה של טכנולוגיית הלייזר הקרקעי למיפוי מאפשרת עתה התמודדות עם הבעיה בצורה שלא הייתה אפשרית עד היום. המחקר מבקש, לפיכך, לבחון את ישימותה של טכנולוגיית הלייזר הקרקעי למתן פתרון לפיתוח מדדים כמותיים המבטאים את אופייה הדינמי של עבודת העגורן באתרי בנייה ואת השלכותיה על בטיחות העבודה.

1.2 מטרת המחקר

מטרת המחקר הינה פיתוח גישה לתיאור אתר הבנייה מבוססת טכנולוגיות מתקדמות של סריקות לייזר, ובעזרתה מיפוי שדה הראייה של מפעיל עגורן הצריח באתר הבנייה. תיאור זה יהווה בסיס להשגת מטרתו העיקרית של המחקר והיא ניתוח והערכה כמותית של נקודות תורפה בטיחותיות בשדה הראייה, ובעיקר "הנפות עוורות", והשתנותן במרחב ובזמן עם התקדמות הבנייה.

אתר בנייה וסביבתו מהווים מרחב גיאוגרפי מורכב הכולל את המבנה עצמו, את אתר הבנייה המהווה סביבה דינאמית, ואת המרחב הגיאוגרפי הסובב את האתר ויכול לכלול אזורים מאוכלסים ותשתיות (כגון קווי חשמל, עמודים – חשמל, תאורה, טלפונים וכד'). סביבה זו, המצויה תחת אזור העבודה של העגורן, חשופה לסיכונים בטיחותיים שתוארו, ועשויה אף לכלול מבנים בהם חיים ופועלים אנשים שכלל אינם קשורים לבנייה באתר. בניית מודל מפורט המתאר בכלים סטנדרטיים (מדידות מבוססות על עבודת מודד סטנדרטית) את אתר הבנייה וסביבתו הינה

תהליך מפרך המספק בפועל מידע דו-ממדי בלבד. טכנולוגיות סריקות לייזר לעומתן מאפשרת קצבי קליטה מהירים וזמני עיבוד קצרים. בשנים האחרונות הופכות מערכות מיפוי מבוסס לייזר לרווחות יותר ויותר. סורקים אלה הם מכשירי חישה אקטיבית המסוגלים לעבוד בכל שעה משעות היום ללא תלות באמצעי תאורה חיצוניים. בשונה מטכנולוגיות מדידה מסורתיות יכולים סורקים אלו למדוד טווחים באופן ישיר, ללא התערבות מפעיל, ולייצר ענני נקודות תלת-ממדיים בצפיפות ודיוק גבוהים במיוחד. המדידה הישירה תאפשר תיאור המרחב התלת-ממדי של האתר. סריקות עוקבות תאפשרנה בנייתה של תמונה תלת-ממדית המוסיפה גם את ממד הזמן, ומאפשרת לפיכך תיאור כמותי של השתנות החשיפה לסיכון בטיחותי בגין מגבלות ראייה שונות אל מול השתנות המבנה והאתר בשלבי הבנייה השונים.

עצם העובדה כי מרבית סיכוני העבודה הכרוכים בעבודת העגורנאי מתייחסת אל המרחב התלת ממדי המלא ולא אל הפשטה דו-ממדית שלו, הופכת את שילוב הטכנולוגיה עם בעיה אקוטית זו לאסטרטגיה אופטימלית להפקת מידע כמותי על אופי ורמות הסיכון.

1.3 שיטת המחקר

פיתוח המתודולוגיה התבסס על בחירת אתר בנייה מתאים כ"אתר הניסוי", עם עדיפות למבנה רב-קומות. עם הקמתם של מגדלים רבים בשנים האחרונות, כשמגמה זו צפויה לגבור בשנים הקרובות, הופך ניתוח הסיכונים משמעותי יותר, באשר במבנה רב-קומות שיעור עבודת העגורן הכרוכה בהנפות עוורות גבוה במיוחד.

שיטת העבודה המוצעת לצורך תיאור האתר מתבססת על סריקות לייזר. הסורק מוקם במספר עמדות כך שהתקבלה תמונה תלת-ממדית מלאה של האתר. מכיוון שסריקות הלייזר מספקות ענן נקודות תלת-ממדי, אין ביכולתן של המדידות הגולמיות לספק אינפורמציה פרשנית על האובייקטים הנסרקים (קרי, קטלוג מכלול המדידות הגולמיות לספק אינפורמציה פרשנית על בודד בעל תגית זיהוי ייחודית). לפיכך, בוחן המחקר את היכולת לתרגם על בסיס אלגוריתמים שפותחו על ידינו (ראה Zeibak and Filin 2009; Branea and Filin, 2008) את הסריקות לכדי עצמים תלת-ממדיים המתארים את המבנה ואת הפרטים הנוספים המצויים באתר הבנייה. האוטומציה שבתרגום המידע הנסרק לכדי עצמים תלת-ממדיים מספקת אמצעי פשוט ויעיל לתיאור האתר ובכך יתרונה. העובדה כי המידע נקלט באופן אוטונומי והנחת המחקר כי ניתן באופן יעיל לתרגמו לכדי עצמים גיאומטריים תתרומנה רבות לניתוח העבודה באתר.

המיפוי וניהול המידע יאפשרו לאמוד באופן מהימן ויעיל את מצבי ההנפות העוורות תוך כדי התחשבות באופיו הדינאמי התלת-ממדי של אתר הבניה. תחום הבנייה הינו תחום קונסרבטיבי העושה שימוש בטכנולוגיות מוכחות. הצעת מחקר זו מציעה שימוש בטכנולוגיות מיפוי עדכניות המאפשרות קביעת אופיים המרחבי (תלת-ממד) של אתר הבנייה וסביבתו. האמצעים העומדים לרשותנו לא היו זמינים עד לפני שנים מספר, ולפיכך, הצעה זו חדשנית בשילוב אותו היא מציעה

בין טכנולוגיות לקליטת מידע גיאוגרפי תלת-ממדי לבין ניצולו לטובת ניתוח בטיחות בעבודה בסביבה דינמית כמו זו המאפיינת אתר בנייה. שימוש בטכנולוגיית לייזר מאפשר קבלת תמונה כללית על אתר הבניה וסביבתו באופן שלא ניתן היה לחזותו עד לפני שנים ספורות. הידע שנרכש בטכניון במהלך השנים האחרונות (Barnea and Filin 2007; Zeibak and Filin 2007; Barnea et al.) מאפשר ניצול יעיל של המידע התלת-ממדי הנקלט לכדי מודלי עצמים ואיתור שינויים. המחקר יבחן את האפשרות לתיאור וניתוח מהימן ויעיל של סביבת עבודתו של העגורנאי ואפיון שדה הראייה שלו בהתייחס למבנה המוקם, המרחב בו מתבצעות מטלות ההנפה השונות, ומיקום העגורנאי. החדשנות והתרומה המדעית הן, אם כך, בשני מישורים: (1) רתימת טכנולוגיה חדישה לתיאור אתר הבנייה בהיבט של מגבלות שדה הראייה של העגורנאי; (2) תמונה כמותית המתארת את הקשרים המרחביים והפונקציונאליים בין המבנה, מעטפת העבודה של העגורן, ועיני העגורנאי, כמו גם את השתנותם על פני ציר הזמן, כל זאת באופן המתייחס למגבלות שדה הראייה (אזורי עבודה מוסתרים, מרחק גדול, זווית עבודה לא נוחה, וכד') בהיבט הבטיחותי של העבודה באתר הבנייה. לצורך כך ילווה המחקר בתצפיות ידניות שתאפשרנה הצמדת תגיות מידע נוספות שאין סריקות הלייזר יכולות (וגם לא מיועדות) לספק (ובעיקר אפיון עבודת העגורן מבחינת סוג מטלות השינוע, תדירותן, וכד').

1.4 שלבי הביצוע

שלבי הביצוע העיקריים היו כדלקמן:

- א. סקר ספרות: נערך בשתי הדיסציפלינות במחקר: (1) הפעלת עגורנים ובטיחות עגורנים, עם התמקדות בנושאי שדה הראייה של העגורנאי; ו-(2) שימוש בטכנולוגיות לייזר באתרי בנייה.
- ב. אפיון אתר הניסוי: לאפיון אתר הניסוי הרצוי הייתה חשיבות ראשונה במעלה. בשלב זה הוגדרו התכונות הגיאומטריות הרצויות של המבנה המוקם וההשלכות שיש להן על שיטת התקדמות הביצוע. נמצא שיש יתרון למבנה רב-קומות המאופיין גם במידה גבוהה של חזרתיות (repetitiveness) תכנונית וביצועית. הוגדרו גם תכונות עגורן בהתאמה לדרישות הניסוי (כולל מרחב תצפית מתא העגורנאי) ותכונות רצויות של העגורנאי (שפה, נכונות לשיתוף פעולה).
- ג. בחירת אתר הניסוי: נבחנו מספר אתרים ונבחר אתר שעמד בדרישות האפיון ושנבנה ע"י חברת בנייה שהחוקרים נהנים באופן מסורתי משיתוף הפעולה שלה.
- ד. סריקות לייזר: זה היה שלב ניסוי השטח המרכזי שנערך באתר הניסוי.
- ה. תצפיות בקרה ואיסוף נתונים ידני: לתצפיות היו שתי מטרות עיקריות: (1) לשמש כבקרה לכל נושא מגבלות הראייה, ומכורח זה התבצעו תצפיות מתא העגורנאי; ו-(2) לאפיון אתר מטלות ההנפה (כגון הבחנה בין יציקת בטון, הנפת רשתות פלדה, הנפה והרכבה של

אלמנטים טרומים, טפסות מתועשות גדולות), כאשר לצורך זה בוצעו תצפיות גם מנקודה (נוחה יותר) שלא על העגורן.

ו. ניתוח ועיבוד הנתונים: נותחו הנתונים הגיאומטריים והפונקציונאליים שנאספו אוטומטית וידנית. שלב זה כלל גם עיבודי תמונה ממוחשבים ופיתוח אלגוריתמים לזיהוי אוטומטי של "שטחים מתים" עפ"י תוצאות סריקות הלייזר.

ז. הכנת דו"ח מסכם: הוכן דו"ח זה, המתייחס למהלך המחקר ולתוצאות.

1.5 ארגון הדוח

הפרק הנוכחי, **פרק 1**, הציג בצורה מתמצנת את הרקע הכללי ותאור הבעיה, את מטרת המחקר, ואת המתודולוגיה ושלבי הביצוע.

פרק 2 מציג את סקר הספרות בנושא בטיחות בעבודה עם עגורני צריח, עם דגש על מגבלות ראייה בכלל והנפות עוורות בפרט.

סקר ספרות מקיף בנושא שימושי סריקות לייזר באתרי בנייה מוצג ב**פרק 3**.

פרק 4 מתוארת מתודולוגיית העבודה; אפיון אתר הבנייה, בחירת האתר, תאור תהליך סריקות הלייזר, והתצפיות שבוצעו מתא העגורנאי.

פרק 5 מפרט את תהליך המדידות הידניות ומטרותיהן (וטבלאות המדידה המלאות מובאות בנספח א').

פרק 6 מציג את תהליך סריקות הלייזר והמודלים שפותחו לצורך המחקר.

שימוש במודלים על אתר הניסוי במחקר מתואר ב**פרק 7**, כמו גם אימות עם תוצאות המדידות הידניות.

פרק 8 מסכם באופן תמציתי את המחקר ומציג רעיונות להמשך מחקר.

2. עבודת עגורני צריח: בטיחות ומגבלות ראייה

2.1 היקף השימוש בעגורני צריח

עגורני צריח מהווים את המרכיב המרכזי של מערך הייצור באתרי הבנייה של זמננו. כמעט בכל אתר בנייה של מבנה ציבור, מסחר, תעשייה, משרדים ומגורים ניתן למצוא עגורן ואף מספר עגורני צריח. המתבונן מקרוב יכול להתרשם שאין הם "נחים" לרגע: שינוע אופקי ואנכי של חומרים ואלמנטים שונים באתר הבנייה הוא הבסיס להתקדמות הביצוע, והרצון לנצל את הציוד באופן מיטבי מביא במקרים רבים להארכת יום העבודה מעבר למקובל או אף לעבודה במשמרות. מספר עגורני הצריח הכשירים בישראל, הנאמד כיום בכ-1,000 עד 1,200 (חלוקת ציוד הנדסי 2005), מרביתם מטיפוס "סובב למעלה" (ראה בהמשך), הוא מהגבוהים בעולם לנפש. מספר זה, יציב כבר משך כ-20 שנה (Shapira et al. 2007), מבטא את היותה של ישראל בעלת תרבות מפותחת של שימוש בעגורני צריח, כמו מדינות אירופה המערבית (ובשנים האחרונות גם אירופה המרכזית והמזרחית). זאת בניגוד, למשל, לארה"ב, שבה תרבות הציוד השלטת היא, באופן מסורתי, של עגורנים מתנייעים, הגם שגם שם שולש מספר עגורני הצריח בעשור האחרון, מכ-1,000 (כמו בישראל) בשנת 2000 לקרוב ל-3,000 כיום [נושא תרבות השימוש בעגורנים מסוגים שונים תואר ונותר במספר מקורות Peurifoy et al. 2000; Shapira and Glascock 1996; Shapira et al. 2007]. יצוין שאפילו בהשוואה לגרמניה המערבית, שנחשבת לערש השימוש בעגורני צריח, היה מספרם של העגורנים מסוג "סובב למעלה" בתקופת שיא הבנייה של סוף העשור הקודם כ-8,000, דהיינו, פי 7 מאשר בישראל, וזאת בשעה שאוכלוסייתה מנתה אז פי 14 תושבים מאשר בישראל; מאז סיום הבנייה של ברלין כבירת המדינה המאוחדת אף ירד מספר העגורנים בגרמניה באופן דרסטי, כך שהיחס לטובת ישראל גדל עוד יותר.

2.2 בטיחות עגורני צריח - כללי

ההשלכות רחבות ההיקף של עבודת עגורן הצריח על בטיחות העבודה נובעות לא רק מהיקף השימוש הנרחב בציוד, אלא בראש ובראשונה מעצם הסכנה הבטיחותית הגלומה בשימוש בו. בעוד אשר אתרי בנייה הינם, מעצם טיבם, מקומות עבודה "מסוכנים" [על פי נתונים שמפרסם משרד התעשייה, המסחר והתעסוקה (משרד התמ"ת 2004), כ-50% מכלל תאונות העבודה שהסתיימו במוות על-פני עשר שנים (1995–2004), מקורן בענף הבנייה (367 מקרי מוות מתוך ס"ה 710, שהם 51.7%); על פי נתונים שמפרסמת הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה (הלמ"ס 2005), ענף הבנייה מעסיק רק כ-5% מכלל עובדי המשק, ובשנים מסוימות הגיע שיעור זה אף לכדי 10%, דהיינו, יש פי חמישה עד עשרה הרוגים בענף הבנייה יחסית לגודל הענף מבחינת מועסקים], השימוש בעגורן לכשעצמו יוצר פוטנציאל גבוה לסיכון בטיחותי ותורם תרומה נכבדה לסך כל הסיכון הבטיחותי באתר. מכאן גם הפוטנציאל הגבוה להגברת בטיחות העבודה באתר ע"י התמקדות במפגעים האופייניים לסביבת העבודה של העגורן. עבודת העגורן מתבטאת בהנפת מטענים בכל המרחב התחום ע"י מעטפת העבודה שלו, כולל מעל ראשי העובדים באתר (ולעתים רבות, בפרט בסביבות עירוניות צפופות, גם מעל עוברי אורח תמימים). האנרגיה הרבה האצורה

בעגורן ודרגות החופש הרבות של המטען המונף הופכים כל מגע בלתי מתוכנן בין המטען או חלק מחלקי העגורן לבין עובדים או עצמים לתאונה קטלנית (או בעלת נזק כספי גבוה) בפוטנציה. בשגרת עבודה המאופיינת בדרך כלל ע"י צפיפות, אילוצי זמן ותקציב, כוח אדם בלתי מיומן, ותרבות לקויה של הקפדה על משמעת וכללי בטיחות נאותים, אין תמה שמתרחשות תאונות רבות – קשות וקלות – ובעיקר מספר עצום של מקרי "כמעט תאונה" (שכמעט אף פעם אינם מדווחים, הגם שרק כפסע בינם לבין תאונות קשות או אף קטלניות) בהן מעורבים עגורנים.

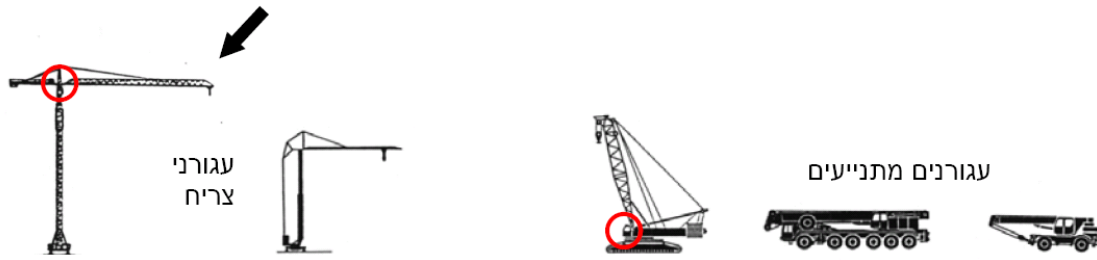
2.3 מגבלות שדה הראייה

אחת הבעיות המרכזיות של עבודת העגורנאי¹ היא מגבלות שדה הראייה שלו. אמנם, אחד המרכיבים המרכזיים בקונצפט של עגורן צריח (Tower Crane) לעומת הקונצפט של עגורן מתנייע (Mobile Crane) הוא שדה הראייה של העגורנאי: בעוד שבעגורן מתנייע הוקרב שדה הראייה מלכתחילה לטובת יתרונות אחרים (בראש ובראשונה קיצור למינימום של משך הזמן מרגע הגעת העגורן לאתר ועד כניסתו לפעולה), הפעלתו של עגורן הצריח מסתמכת כמעט בלעדית על שליטה ויזואלית (ראייתית) של העגורנאי בכל מרחב הפעולה של העגורן (Shapiro et al. 2000; Peurifoy et al. 2006; Shapira 2008). כפועל יוצא מכך, ממוקם העגורנאי בעגורן המתנייע במפלס המרכב התחתון של העגורן, בגובה הקרקע, ואילו תא העגורנאי בעגורן הצריח ממוקם במרומי העגורן, ולעולם יהיה גבוה יותר מהמבנה אותו משרת העגורן.

איור 1-2 מובא כדי להמחיש את האמור לעיל (העיגול מסמן את מיקום העגורנאי) וכן כדי ליצור בסיס טרמינולוגי אחיד בדוח מחקר זה. כפי שרואים באיור, עגורנים מתנייעים יכולים להיות זחליים או אופניים. לגבי עגורן צריח, הצללית משמאל (מסומנת בחץ) הינה של עגורן צריח "חוליות" (נקרא כך על שום הצריח המורכב מחוליות) או "סובב למעלה" (Top-Slewing), בעל זר סיבוב עליון, נשוא מחקר זה, שהוא עגורן הבנייה השכיח בארץ ובעולם באתרי בנייה של מבנים המתנשאים לגובה של יותר ממספר קומות בודדות; זאת להבדיל מעגורן צריח "טלסקופי" (או "סובב למטה" Bottom-Slewing, בעל במת סיבוב תחתונה), הצללית מימין, המתאים לשמש במבנים נמוכים.

מכאן ואילך בדוח מחקר זה, המונח "עגורן" או "עגורן צריח" ישמש לתצורת העגורן הנראית בצד שמאל של איור 1-2 (דהיינו, לעגורן צריח "סובב למעלה").

¹ הדוח כתוב בלשון זכר מטעמי נוחיות בלבד. ספציפית לגבי עגורנאי: בכל מקום בו מופיעה בדוח המילה "עגורנאי", הכוונה היא גם ל"עגורנאית". במציאות העבודה בכל העולם וגם בישראל, מספר העגורנאיות זעום אמנם, אך במספר אתרי בנייה בהם בוצעו מחקרים קודמים בתחום בטיחות העבודה עם עגורנים (שפירא ולחין 2004; שפירא ושמחה 2005; שפירא ואחרים 2009), שימשו נשים כעגורנאיות, כולן יוצאות בריה"מ לשעבר, שם מקובלות עגורנאיות במידה מסוימת יותר מאשר בעולם המערבי.



איור 2-1 תצורות של עגורני בנייה ומיקום העגורנאי

למגבלות שדה הראייה של העגורנאי משמעותיות בטיחותיות שלא ניתן להגזים בחריפותו, שהרי ממד הראייה והשליטה הויזואלית על כל שטח העבודה, לרבות אזורי הטעינה, אזורי הפריקה, ומסלולי ההסעה, מהווים את התנאי הבסיסי לעבודה בטיחותית. כאשר מוגבל שדה הראייה (כגון בגין מרחק רב או תאורה בלתי מספקת) או נחסם כליל (בגין עבודה באזור מוסתר מעיני העגורנאי), נפגמת יכולתו של העגורנאי לבצע את עבודתו באופן בטיחותי מלא; האטת קצב עבודתו חושפת אותו ללחצים סביבתיים (כגון ממנהל האתר או מנהל העבודה) לשוב לעבוד בקצב "נורמלי" וכך נפגעת הבטיחות עוד יותר. בנוסף לכך, נפגעת (או אף אובדת) יכולתו לפקח על קשירה נאותה של המטען, על כל המשתמע מכך מבחינת הסיכון הבטיחותי באתר. הפתרון המקובל [וגם זה המעוגן בתקנות הבטיחות (עגורני צריח 1966)] לא השתנה עשרות שנים, למעשה מאז צצו עגורנים לראשונה, והינו שימוש באתרים. בשנים האחרונות נוספו אמצעי ראיית עזר שמבוססים על מצלמה המותקנת על העגורן והמשדרת לתא העגורנאי. לפתרונות אלה, המפורטים בהמשך, מגבלות שונות, ובכל מקרה הפעלתם אינה מושכלת, או תוצאה של תכנון מקדים כלשהו. הגם שמיקום העגורנאי במרומי העגורן מקנה לו שדה ראייה רחב ומבט "ממעוף הציפור" (Bird's eye view) על מרחב העבודה, אין הוא נטול מגבלות. דווקא בגין ההסתמכות הקונצפטואלית על קו ראייה ברור ובלתי מופרע בין העגורנאי למטען ולמסלול ההובלה בעגורן צריח לעומת עגורן מתנייע (כאשר בזה האחרון מלכתחילה אין מסתמכים על ראייה כזו), השלכותיהן של מגבלות שדה הראייה בעגורן צריח הינן בעלות משמעות רחבה ועמוקה על בטיחות העבודה (Shapira et al. 2008).

איור 2-2 מציג את המגבלות העיקריות של שדה הראייה של העגורנאי בעגורן צריח (Shapira et al. 2008):

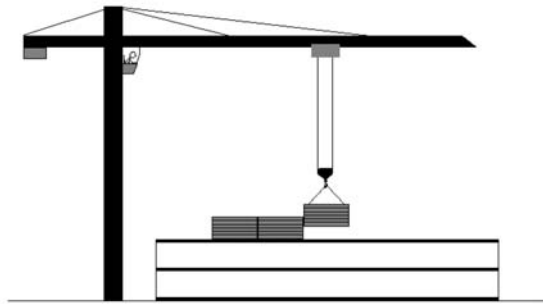
א. מרחק גדול של אזור הטעינה ו/או אזור הפריקה מעיני העגורנאי. העגורנאי אמנם "רואה" את המטען, אך המרחק הרב מקשה עליו את הדיוק בעבודה. זהו מצב שכוח במבנים גבוהים בהם נדרשת לעתים קרובות הנפה מ/אל הקרקע (בנוסף להעברת חומרים ואלמנטים שונים בין הקומות, המתבצעת במרחק קצר יותר מעיני העגורנאי). אך המצב שכוח גם בשלבי העבודה הראשונים של הביצוע, באתרים בהם מוצב עגורן הצריח מתחילת העבודה למלא גובהו החופשי, גם אם אין בכך צורך ביצועי, וזאת בין אם מפאת מכשולים באתר ובין אם כדי לחסוך מאוחר יותר בעלויות ובזמן הכרוכים בהגבתו, כאשר ביצוע המבנה יתקדם וידרוש זאת (Peurifoy et al. 2006).

ב. פריקה ו/או טעינה בזווית ראייה בלתי נוחה. הכוונה היא לזווית ראייה "שטוחה", דהיינו, המרחק האנכי בין עיני העגורנאי לנקודת הפריקה או הטעינה הינו קטן, בעוד שהמרחק האופקי בין שני אלו גדול יחסית (אף בצורה קיצונית יותר מהמוראה באיור). דוגמה למגבלה זו היא אתר בנייה בתוך אזור טופוגרפי נמוך (כגון וואדי). העגורן מוצב, למעשה, במעין חפירה עמוקה, כאשר הוא פורק חומרים ואלמנטים ממשאות הממוקמות על כביש העובר מחוץ לאתר, בקו טופוגרפי גבוה יותר, שגובהו נמוך אך במעט מגובה תא העגורנאי. פריקה של אלמנטי תקרה טרומים הדורשת מיקום מדויק של אונקל ההרמה מעל מרכז הכובד של האלמנט, ולאחר מכן הנחתם במדויק במיקומם במבנה, הן דוגמאות נוספות למגבלה זו.

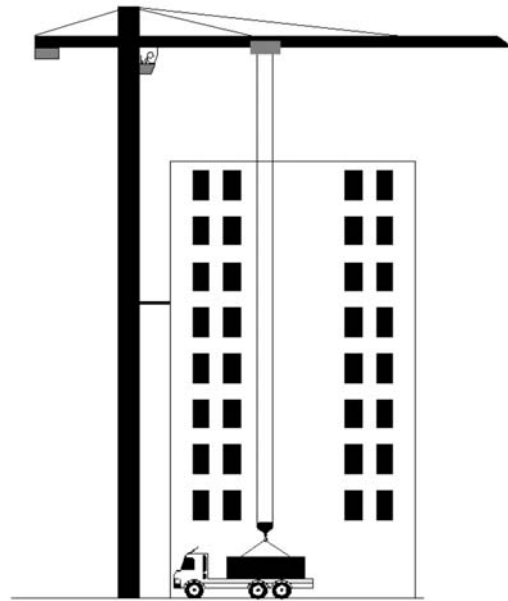
ג. עבודה בתנאי תאורה גרועים. בפרט בתקופת החורף, כאשר הימים קצרים, מתחיל יום העבודה בשעות השחר טרם זריחת השמש ואפילו משמרת עבודה מקובלת בת 8 עד 10 שעות עשויה להסתיים בשעות בין הערביים או אחרי השקיעה. המגבלה עוד יותר מובהקת כאשר משמרת העבודה מתארכת אל תוך הלילה, וכמובן כאשר עובדים בשתי משמרות מלאות (או אף שלוש). גם באתר מואר היטב לא ניתן ליצור מצב תאורה כמו אור השמש.

ד. מעבר בין אזורים מוארים לאזורים מוצלים. דוגמה טיפוסית היא הנפות בתוך פירים חשוכים של מעליות וחדרי מדרגות. לוקח פרק זמן מינימלי מסוים לעין האדם להתרגל לתנאי התאורה המשתנים, הן במעבר מאזור בהיר לאזור מוצל והן במעבר בכיוון ההפוך. רגע המעבר הוא רגע בו העגורנאי כמעט ואינו רואה דבר, למשך כמה שניות, ובכך טמון סיכון בטיחותי. כמו-כן, בכל מקרה אין תנאי התאורה באזורי המבנה המוצלים נאותים בדרך כלל.

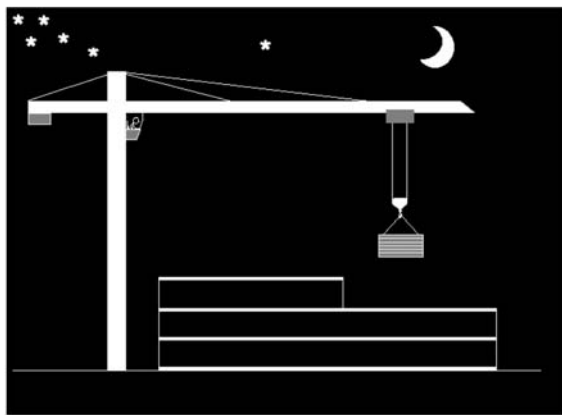
ה. הסתרת זירת העבודה – נקודת הטעינה, נקודת הפריקה, מסלול ההסעה – בחלקה או במלואה מעיני העגורנאי. זהו אולי המצב הן השכיח ביותר והן המסוכן ביותר; ברוב המקרים הללו יהיה זה המבנה המוקם עצמו שישתיר מעיני העגורנאי את זירת העבודה, והעגורנאי נאלץ אז לבצע מה שמכונה בשטח ובספרות "הנפה עיוורת" (Blind Lift). בכל אתר בנייה בו משמש עגורן צריח, מתקיימים מצבים של הנפות עוורות, והשוני הוא רק באיזו מידה – מועטה או מרובה. במחקר שאיתר וניתח גורמי סיכון בטיחותי מרכזיים באתרי בנייה עם עגורני צריח (שפירא ולחין 2004), נמצא שלהנפות עוורות השפעה רבה על הסיכוי להתרחשות תאונה (4.2 בסקלה בה הדרגה הגבוהה ביותר היא 5 "השפעה רבה מאד"); רק שלושה גורמים זכו במחקר זה להערכה זהה או גבוהה יותר (מ-4.2 עד 4.4), ואילו יותר 18 הגורמים שאותרו זכו להערכה זהה או נמוכה יותר (מ-4.2 עד 2.7).



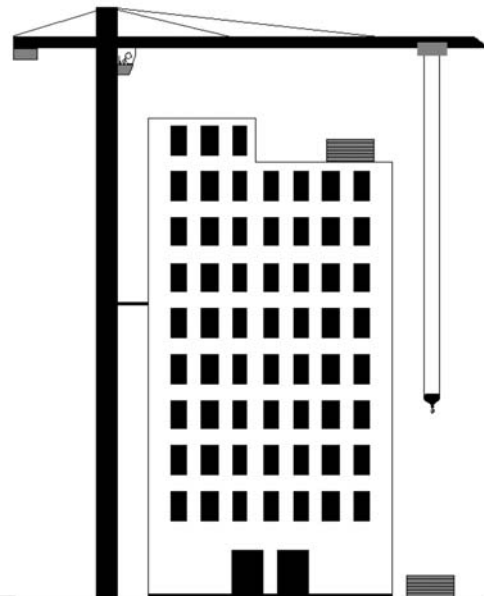
ב. פריקה/טעינה בזווית ראייה בלתי נוחה



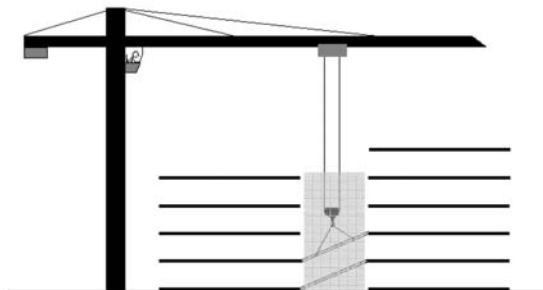
א. מרחק גדול של נקודת הפריקה/טעינה מעיני העגורנאי



ג. עבודה בתנאי תאורה גרועים (שעת בין הערביים, לילה)



ה. אזור הפריקה/טעינה או מסלול ההסעה מוסתר מעיני העגורנאי



ד. מעבר מאזור בהיר לאזור מוצל תוך כדי הנפה

איור 2-2 מגבלות ראייה של העגורנאי בעגורן צריח

ניתוח הבעיה מראה כי בליבה עומד חוסר היכולת לדעת (לא כל שכן לאמוד כמותית), עד כמה מוגבל אזור הראייה באתר נתון, מה מידת ההסתרה של אזורי העבודה במהלך עבודת העגורן; כיצד משתנית ההסתרה עם התקדמות הבנייה והשינויים הגיאומטריים שעובר המבנה המוקם

ועם הגבהת העגורן; באילו ממטלות ההנפה של העגורן תופסות מגבלות הראייה נתח רב יותר מאשר הן תופסות במטלות הנפה אחרות; באיזו מידה מושפעות ממגבלות שדה הראייה הן הסביבה המיידית (אזורי העבודה השונים, המתקנים הארעיים באתר) והן הסביבה הקרובה (הולכי רגל מחוץ לאתר או מכוניות שחונות ברחוב בצמוד לגדר האתר, אבל בתחום מעטפת העגורן, כגון עגורן המניף אלמנטים ממשאית שאינה יכולה להיכנס לאתר או ממלא דוד בטון מערבול מחוץ לאתר); ועוד כהנה וכהנה שאלות שלו ידענו התשובות עליהן, ניתן היה לתכנן מראש ולהקצות בצורה מושכלת את הפעלת האמצעים השונים.

2.4 הנפות עוורות

"הנפה עיוורת" (Blind Lift), או הנפה בשטח "עיוור" או "מת" (Blind Spot) היא, כאמור, הבעיה העיקרית של שדה הראייה של העגורנאי². בתור שכזו, היא נזכרת במספר מחקרים נוספים לאלה שהוזכרו כאן, ומן הראוי לבדוק באילו הקשרים יש אליה התייחסות במחקרים הללו. (הערה: חלק מהמאמרים הנסקרים בפרק זה מוזכרים שוב בהמשך סקר הספרות, בחלק המתייחס ליישום טכנולוגיית לייזר בבנייה.) Lee ואחרים (2006) מקוריאה פיתחו עזר ראייה לעגורנאי (בדומה לזה שפיתחו שפירא ואחרים בסוף שנות ה-1990 ושהוצג במאמר, הנזכר בסקר זה, משנת 2008). מטרתם הייתה לשפר את פיריון העבודה, ובמאמרם הם מתייחסים להנפות עוורות רק בהקשר של קיצור זמני המחזור והגברת תפוקת העגורן, ולא בהקשר של בטיחות. קבוצת חוקרים אחרת, גם היא מקוריאה (Lee et al. 2009) הציגה קונצפט של עגורן רובוטי, ובמסגרת זו פיתחה מערכת מבוססת-לייזר לעקיבה של מסלול ההנפה של העגורן. השטחים המתים במאמר זה מוזכרים בהקשר של הפרעות שאותרו במערכות עקיבה מבוססות טכנולוגיות אחרות, אותן מציגים המחברים במאמר, ושהמערכת שהם מציגים אינה מושפעת מהפרעות כאלה; גם כאן הפיתוח הוא מונע שיפור הפיריון.

קבוצת חוקרים מהמזרח הרחוק, בהובלת Kang מטייוואן, מתמקדת במחקר המשלב טכנולוגיות מידע, סימולציה, וויזואליזציה מתקדמות לשיפור הבטיחות וייעול עבודת עגורני צריח. הדוגמה האחרונה של מחקריהם היא שימוש ב"מציאות מוגברת" (Augmented Reality) לפיתוח עזר ראייה ממוחשב בתא העגורנאי (Chen et al. 2011). קבוצת חוקרים אחרת, בהובלת Tam מהונג קונג, פרסמה סדרת מאמרים המתמקדת בתכנון זמן התעסוקה של עגורן בהקמת מבנים גבוהים; דוגמה בולטת היא מודל לחיזוי זמני מחזור (Tam et al. 2002). בכל המחקרים הללו מודגשת המרכזיות של בעיות בטיחות הנובעות ממגבלות שדה הראייה של העגורנאי בכלל וההנפות בשטחים מתים בפרט.

במחקר של Sertyesilisik ואחרים (2010), שבדק את הבטיחות באתרי בנייה בבריטניה והתבסס על Case studies ועל תשאול, העריך האחראי על עבודת עגורן הצריח באחד האתרים שסכנת הבטיחות הגדולה ביותר הכרוכה בעבודת העגורן היא הנפות עוורות (זאת בניגוד לעגורנאי באותו אתר, שלהערכתו הסכנה הגדולה ביותר נובעת מהפעלת העגורן ע"י מפעיל שלא עבר הכשרה

² מילות מפתח נוספות לאיתור מקורות רלוונטיים היו כדלקמן: Field of vision; Line of sight; Limited view; Visibility.

מספקת). Teizer ואחרים (2010) פיתחו מערכת מבוססת טכנולוגיית RF (Radio Frequency) להתרעה בזמן אמת על קירבה מסוכנת של ציוד לאנשים, לציוד אחר, או לכל אובייקט שהוא. בין סוגי הציוד הנזכרים במאמר גם עגורנים, אך המאמר, המתייחס גם לשימוש בלייזרים לזיהוי שטחים מתים, מתרכז בשטחים מתים כתוצאה מנסיעה לאחור של צמ"ה.

Hinze, מהחוקרים המובילים בארה"ב בתחום הבטיחות בבנייה, חקר יחד עם Teizer (2011) תאונות באתרי בנייה שהסתיימו במוות, הקשורות בציוד בנייה, ושמקורן בראייה (Visibility-related fatalities), זאת על בסיס תיקי חקירה של תאונות בארה"ב בשנים 1990–2007. הרוב המכריע של המקרים היה קשור בכלי צמ"ה. בעיות הראייה שזוהו היו שטח מת (קבוע ומשתנה), תאורה חזקה מדי, תאורה חלשה מדי, והפרעות/מכשולים לראייה (מתייחס לאי-רציפות בקו הראייה של המפעיל, אבל לא לשטח מת). זוהו סיבות ברורות של אי-לבישה של אפוד זוהר ואי-שימוש בהתרעה קולית בנסיעה לאחור. המחקר מעניין בכללותו אבל אינו מתמקד בעגורנים.

כל המחקרים דלעיל מדגישים אמנם את חשיבותו של נושא מגבלות שדה הראייה בכלל וההנפות העוורות בפרט בהקשר של בטיחות העבודה עם עגורנים (והגברת פירון העבודה), אך אף לא אחד מהם טיפל בהנפות עוורות בהיבטים שהם עניינו של מחקר זה, דהיינו, מיפוי כמותי, בזמן ובמרחב, בהקשר של שגרת העבודה של העגורן: היקף התופעה של הנפות עוורות על פני יום העבודה או תקופת הקמת שלד הבניין, פירוס עפ"י סוגי מטלות הנפה, מדידה גיאומטרית בהתייחס למיקום העגורן, וכיו"ב.

2.5 פתרונות קיימים

ההתמודדות עם מגבלות הראייה דלעיל, ובעיקר עם הנפות עוורות – המרכזית והמשמעותית שביניהן – היא בשני אופנים: (1) שימוש באתתים; (2) שימוש באמצעי עזר לראייה. הראשון מבין שני אלה הוא עתיר כוח אדם ומהווה מזה שנים רבות את הפתרון המסורתי לבעיה; הפתרון השני הוא טכנולוגי באופיו והשימוש בו החל רק בשנים האחרונות. לכל אחד מהם מגבלות משל עצמו, כמפורט בהמשך, והמחקר המוצע מבקש, בין היתר, ליצור בסיס ידע להתמודדות עם מגבלות אלה.

2.5.1 אתתים

המונח "אתת", או "מוסמך למתן איתות" בלשון תקנות הבטיחות בעבודה (עגורני צריח 1966), כולל למעשה שני בעלי תפקידים – (1) אתת, המוצב ליד נקודת הטעינה או הפריקה; (2) משגיח מסלול, המוצב בנקודה כלשהי כך שהוא רואה הן את מסלול ההרמה (או קטע ממנו, עליו הוא אחראי) והן את העגורנאי, האתת, או משגיח מסלול סמוך לו. האתת (Signaler), המכונה לעתים "העיניים והאוזניים" של העגורנאי, משמש בדרך כלל גם כעניבן (Slinger), או האחראי לקשירת/פריקת המטען. אם כך, על האתת רובצת אחריות בטיחותית רבה. דא עקא שהפעלת אתתים באתרי בנייה הינה בעייתית מיסודה (שפירא ולחין 2004; MacCollum; Häkkinen 1993; Shapira and Lyachin 2009; Neitzel et al. 2001; Ross 1996; 1993):

- מאחר שהיא עתירת כוח אדם, עלותה גבוהה;
- בגין אופיו של השרות שמספק העגורן באתר, נדרשת למעשה הצבת אתתים במספר מקומות בו-זמנית;
- כשרה בלתי נאותה של אתתים (עד כדי אתתים חסרי הכשרה בכלל) הינו מצב שכוח למדי – גם אם פועלים הלכה למעשה עפ"י תקנות הבטיחות, פותחות התקנות פתח ל"הכשרה זמנית", והקריטריונים להסמכת אתתים גמישים למדי (עגורנאים, מפעילי מכונות הרמה אחרות ואתתים 1992);
- קיימות בעיות תקשורת שונות ומחסומי שפה (בעיה חריפה בשוק העבודה הנוכחי בארץ ובעולם בכלל, ובאתרי בנייה בפרט, עם ריבוי העובדים הזרים); ולבסוף:
- יש בעיה אינהרנטית בעצם חלוקת האחריות להנפה בין העגורנאי לבין האתת.

במסגרת מחקר שצוטט כבר לעיל, שאיתר וניתח גורמי סיכון בטיחותי מרכזיים באתרי בנייה עם עגורני צריח (שפירא ולחין 2004), ראינו 19 מנהלי ציוד וממוני בטיחות ותיקים ומנוסים מעשר חברות הבנייה המובילות דאז בארץ (ושהחזיקו יחדיו בצי עגורנים שהיוו קרוב ל-30% מכלל עגורני הצריח בישראל). הם העריכו שניסונו של האתת הינו אחד הגורמים המרכזיים המשפיעים על הסיכוי להתרחשות תאונה (4.1 בסקלה בה הדרגה הגבוהה ביותר היא 5 "השפעה רבה מאד"). מרבית המרואיינים אף ביקרו בחריפות את ההפקרות, כלשונם, השוררת בתחום זה באתרי בנייה ותלו בה את האשמה לחלק ניכר מהתאונות ו"כמעט תאונות" המתרחשות באתרים.

2.5.2 אמצעי עזר לראייה

החל מסוף שנות ה-1990 נכנסו לשימוש מערכות ראיית עזר לעגורנאי; הן מוכרות בארץ בשם מר"מ – מערכת ראייה מלאכותית – ובחול"ל בשם Crane Camera. המערכת הישראלית פותחה והוטמעה בחברות הבנייה בארץ ע"י צוות בן שלושה אנשים: שני חוקרים מהטכניון (החוקר הראשי הראשון בהצעה זו היה אחד מהם) ואיש אלקטרו-אופטיקה מהתעשייה. המערכת כוללת שתי יחידות, חיצונית ופנימית. היחידה החיצונית מותקנת ע"ג עגלת העגורן (Trolley) ומרכיביה העיקריים הם מצלמה, פנל סולרי, וסוללה; היחידה הפנימית מותקנת בתא העגורנאי ומרכיביה העיקריים הם מסך, יחידת הפעלה ובקרה, ואנטנה. המצלמה נעה עם עגלת העגורן ועוקבת באופן תמידי אחרי אונקל ההרמה, דהיינו, נקודת הטעינה, מסלול ההרמה, ונקודת הפריקה. היא משדרת את התמונה בשידור אלחוטי למסך שבתא העגורנאי, והלה יכול לראות באופן רציף את אזור הטעינה/פריקה/הסעה, בדרגות זום שונות (Shapira et al. 2008). מערכות אחרות המוצעות בחול"ל פועלות בצורה דומה, עם וריאציות בנושא השידור (לעתים קווי), מקור הספקת כוח, ועוד (Howes 2005; Orlaco 2006; Shapira et al. 2007). באופן זה מוענק לעגורנאי ממד ראייה נוסף המנטרל בצורה משמעותית את מגבלות שדה הראייה שלו, כמפורט לעיל. עורך כתב העת הידוע בנושא עגורנים, *Cranes Today*, במאמר מערכת על פיתוחים טכנולוגיים, הציב את המצלמה המותקנת על זרוע העגורן בראש רשימה של ארבע דוגמאות, בקובעו ש"אין להתפשר בנושא ציוד בטיחות לעגורן" (Vallely 2005) "There can be no compromise on crane safety equipment".

הבעיה המרכזית בהחדרת המערכת לשימוש היא בעיית עלות: לפי מקורות שונים, מחיר המערכת הינו כ-10,000 עד 20,000 דולר אמריקאי לרכישה, או כ-500 עד 1,000 דולר לשכירות חודשית. זוהי אמנם תוספת שולית למחיר עגורן הצריח או לעלות השימוש החודשי בו. אבל תעשיית הבנייה הינה שמרנית באופייה, ואינה ממהרת לאמץ חידושים כאשר העלות במונחים כספיים ברורה ומיידית, ואילו את התועלת קשה לכמת והיא גם באה לידי ביטוי לא מייד אלא לאורך זמן (Tatum 1987; Rosenfeld 1994; Slaughter 1998; Dubois and Gadde 2002; Blayse and Manly 2004). אותן חברות בנייה בארץ שכן מצאו לנכון להצטייד במערכת כזו, אחת או יותר, בקשו לדעת באיזה מאתרי הבנייה שלהן תניב המערכת תועלת מרבית, לעומת אתרים אחרים בהם תהיה תועלתה פחותה.

2.6 סיכום

לא קיים כיום כל מודל המאפשר "למדוד", או להעריך באופן כמותי (וודאי שלא מראש), את שיעור הזמן בו עבודת העגורנאי סובלת ממגבלות הראייה שלו. בפרט אמור הדבר לגבי הנפות עוורות, שהן תוצאה, בין היתר, של יחסים גיאומטריים. מידע כזה, לו היה ברשות חברות הבנייה, היה מאפשר להן להקצות בצורה מושכלת וממוקדת את אותם המשאבים שהן כן מוכנות להשקיע בשיפור בטיחות העבודה. יצירת זיקה בין תכנון התקדמות העבודה, מטלות ההנפה של העגורן, ואפיון שדה הראייה של העגורנאי יכולה לאפשר תכנון מוקדם ומדויק של דרישות לאתרים לאורך כל מהלך הביצוע: חסכון מצד אחד, ואפשרות השקעה ממוקדת בהכשרה נאותה מצד שני.

3. סורקי לייזר בבנייה

בחלק זה ביקשנו לסקור שימושים שונים של סורקי לייזר בבנייה בכלל ועם עגורנים בפרט. בחיפוש ראשוני נמצאו מעל 100 מאמרים, מתוכם כ-50 מאמרים סוננו לפי רלוונטיות, ותוך שמירה על עדכניותם (החל מ-2002). המאמרים נמצאו בכתבי עת (כגון *Automation in Construction, Journal of Computing in Civil Engineering, Journal of Construction Engineering and Management*), כנסים (כגון של ASCE – American Society of Civil Engineers ושל ISARC – International Symposium of Automation and Robotics in Construction), וחיפוש כללי באינטרנט שהעלה מאמרים מ-*Journal of Surveying Engineering, Journal of Architectural Engineering, Journal of Geotechnical Engineering for Transportation Projects*.

3.1 כללי

סריקת לייזר הינה טכנולוגיה חדשה יחסית בעלת יתרונות משמעותיים בעבור מדידות בתלת-ממד. בשונה מטכניקות מיפוי קונבנציונליות (למשל מדידות קלאסיות או פוטוגרמטריה), סורק הלייזר מספק תיאור מהיר וישיר של גיאומטריה תלת-ממדית, אשר אינו תלוי בתנאי תאורה ומזג אוויר, הנרכש בצורה אוטומטית. יתר על כן, ענני הנקודות המתקבלים מסריקות לייזר הינם בעלי צפיפות גבוהה ודיוק גבוה, ובכך מאפשרים תיאור מפורט של אובייקטים ללא תלות במורכבות צורתם. כתוצאה מכך, מספר הולך וגדל של יישומים משתמשים בטכנולוגיית סורקי הלייזר כאמצעי למידול סצנות תלת-ממדיות. רשימה חלקית כוללת את היישומים הבאים: תיעוד אתרי מורשת תרבות (Barber et al. 2005; Sternberg 2006; Visintini et al. 2006), מודלים אדריכליים (Levoy et al. 2000; Akca et al. 2006), שיקום (רקונסטרוקציה) של מבנים (Alshawabkeh and Haala 2005), חקירת תאונות (Pagounis et al. 2006), הנדסת מבנים (Gordon et al. 2004), מודלי ערים תלת-ממדיים (Abo-Akel et al. 2006) ומידול פעילות באתרי הבנייה (Girardeau-Montaut et al. 2005; Teizer et al. 2010a). כל אלו מתייחסים לדרך המהירה שבה ניתן לחלץ מידע מהנתונים כסיבה העיקרית להעדפת נתוני לייזר על מקורות חלופיים של מידע.

לצורך נוחות הכתיבה יוגדרו שני מושגים הנפוצים בשימוש בסורקי לייזר: ענן נקודות ועיגון (רגיסטרציה).

3.1.1 ענן נקודות

מיקום תלת-ממדי של נקודה נקבע מתוך מידע המתקבל מסורק הלייזר. מידע זה כולל מידע זוויתי המתאר את כיוון הנקודה ביחס לראשית מקומית ומידע לגבי מרחק הנקודה מהחיישן הנמצא בסורק. כלומר, בעבור כל נקודה ניתן לקבוע את המיקום שלה בקואורדינטות כדוריות (ρ, ϕ, θ) או קרטזיות (x, y, z) . כתוצאה מסריקת לייזר של סצנה או אובייקט, מיליוני נקודות יכולות להתקבל בתדירות של יותר מ-10,000 נקודות לשנייה, היוצרות ענן נקודות.

ענני הנקודות המתקבלים מסורקי הלייזר דורשים לעיתים עיבודים ושיפורים. Tang ואחרים (2009), למשל, מציעים שיטה לכימות קצוות אובייקטים האובדים בעיבוד נתוני הלייזר עקב

מחיקת נקודות שנמדדות במקומות של אי-רציפות מרחבית. נקודות אלה, הנקראות mixed-pixels, נמחקות מסט הנקודות עוד לפני תהליך העיבוד, דבר שגורם לחוסר דיוק בממדי האובייקטים הנמדדים באמצעות סורק הלייזר הקרקעי.

הכותבים מציעים שיטה בעזרתה ניתן לחזות את כמות הקצוות שיאבדו בניתוח הנתונים. באופן כללי, השיטה מבוססת על ההנחה כי ככל שטביעת הרגל של הלייזר (laser spot size) גדולה יותר, כך ההסתברות שהמדידה נפרסת על אי-רציפות מרחבית גדולה יותר, ולכן ישנו סיכוי טוב יותר שקיימת שם נקודת mixed-pixel – דבר שיכול לגרום לאיבוד קצוות. מצד שני, ככל שצפיפות הנקודות גדלה, ישנו יותר מידע על הקצוות, משמע: פחות קצוות אובדים כתוצאה מה-mixed-pixel. במאמר מפורטות נוסחאות בעזרתן ניתן לחשב את גבולות מיקום קצוות האובייקט (גבול עליון ותחתון) וכן את גודל נקודת הלייזר והמרווח בין שתי נקודות סרוקות, כל זאת לפי פרמטרי הסורק (מרחק הסריקה, הרזולוציה הזוויתית, מהירות סיבוב הסורק, גודל נקודת הלייזר, זווית הפגיעה, פיזור קרן הלייזר, וקצב דגימת המדידה).

3.1.2 עיגון (רגיסטרציה)

בדרך כלל, סצנות מורכבות אינן יכולות להיקלט רק בעזרת סריקה אחת של הסצנה, ולכן יש לבצע סריקות נוספות ממיקומים שונים. פעולת ההבאה של הסריקות השונות לידי מערכת יחוס אחת נקראת עיגון (רגיסטרציה). Franaszek ואחרים (2009) מציעים שיטה אוטומטית לאיתור מהיר של מרכזי כדורים לצורך רגיסטרציה של תמונות טווחים הנרכשות מחיישנים כלשהם (כגון סורקי לייזר ומצלמות טווחים). הכותבים מציינים כי התוכנות המסחריות הקיימות, אלו שמבצעות רגיסטרציה מבוססת-מטרות, דורשות מהמשתמש לזהות ידנית את המטרות. יחד עם זאת, קיימות שיטות אוטומטיות רבות המתמקדות בחילוץ אובייקטים ממודלי CAD של אתרי בנייה, שנבנו מתוך תמונות טווחים, אך רובן הגדול עושה שימוש או במטרות התופסות שטח ניכר מהסצנה, או במטרות קטנות שזזות ביחס לרקע סביבן. מכיוון שהמטרות בהן נעשה שימוש לצורך רגיסטרציה אינן זזות, והן תופסות חלק קטן מהסצנה, השיטות האוטומטיות הקיימות לא מתאימות למטרה זו. אי-לכך מציעים הכותבים אלגוריתם לאיתור אוטומטי ומהיר של כדורים בסצנה ורגיסטרציה של תמונות הטווחים (range images). האלגוריתם המוצע מתחלק לשני שלבים עיקריים: השלב הראשון – איתור אוטומטי של הכדורים: בעבור כל סט נתונים מיוצרת רשימה של מרכזי כדורים אפשריים; והשלב השני – רגיסטרציה: בעבור כל צמד של סט נתונים, ביניהם צריכה להתבצע רגיסטרציה, נמצא זוג של משולשים חופפים, להם פונקצית שגיאות מינימאלית. כלומר: הרגיסטרציה מתבססת על שלוש נקודות תואמות, שהן מרכזי הכדורים. ערכי הטרנספורמציה המתמירה ממשולש אחד למשנהו הם הערכים ההתחלתיים לרגיסטרציה של סט נתונים זה לזה. איתור מרכזי הספירות נעשה בעזרת שני פילטרים, האחד מתבסס על ההנחה שמסביב לכדורים לא תהיינה נקודות סרוקות, שכן חייב להיות קו ראייה נקי בין הסורק והכדור, והשני העושה שימוש באילוצים גיאומטריים, לפי חלוקת הנקודות הנמצאות מאחורי הכדור, לפני הכדור, ועל הכדור. בעזרת אוסף הנקודות שנמצא על הכדור מתואם הכדור ונמצא מרכזו. בניסוי שבחן את השיטה המוצעת נמצא כי ניתן לחשב בעזרתה במהירות ערכים

התחלתיים טובים מאוד לרגיסטרציה, ללא מידע קודם. כל מידע קודם בנוגע לסצנה אינו תורם לביצועי האלגוריתם המוצע, מלבד מידע על המרחקים בין מרכזי הכדורים.

ניצול הכיסוי הזוויתי האחד, כמו גם הסריקה הפנורמית, מאפשר ניתוח רסטרי יעיל של המידע הנקלט. בהקשר זה, Barnea ו-Filin (2007, 2008, 2010) מציעים פתרון לנושא הרגיסטרציה שבין סריקות קרקעיות. על-מנת לצמצם את מעורבות המשתמשים בעיבוד המידע, הוצג מודל המשתמש בייצוג פולארי של הסריקות ובזיהוי נקודות עניין טבעיות לביצוע העיגון ההדדי; לאחר מכן מוצעת שיטה המשתמשת במידע הרדיומטרי הנרכש על ידי מצלמות המותקנות בסורקים מודרניים.

היבט נוסף בעל רלבנטיות למחקר הוא איתור שינויים מסריקות לייזר קרקעיות. סורקי לייזר יכולים לספק מידע עדכני על שינויים שהתרחשו בשטח בסדרי גודל גדולים. Filin ו-Zeibak (2008) משתמשים בייצוג הפנורמי לצורך זיהוי שינויים בשטח שחלו בין סריקות במועדים שונים. המודל מתגבר על קשיים הנובעים מגיאומטריית הסורק ומאפשר השוואה יעילה של סריקות ממיקומים כלליים של הסורקים.

ישנם מאמרים המתארים תהליך עבודה עם סורקי לייזר מתחילתו ועד סופו תוך שימוש באמצעים קיימים, ללא פריצת דרך של ממש. למשל, Goedert ואחרים (2005) מתארים תהליך שימוש בסורק לייזר מתחילתו ועד סופו כולל הדפסת המודל במדפסת מיוחדת המדפיסה שכבות דו-ממדיות ומרכיבה אותן אחת על גבי השנייה [Rapid Prototyping (RP) – Selective laser sintering]. התהליך מתחיל בסריקות לייזר קרקעיות, מהן מתקבלים ענני נקודות של האתר מכמה עמדות. לאחר מכן מתבצעת רגיסטרציה בעזרת התוכנה המסחרית של סורק הלייזר. ענן הנקודות לאחר הרגיסטרציה עובר תהליך טריאנגולציה. התוצאה נשמרת לקובץ CAD המתאר את האתר וממנו יוצרים מודל תלת-ממדי פיזי בעזרת מדפסת ה-RP.

Arayici (2007) מציג שיטה למידול תלת-ממדי של בניינים בעזרת סורק לייזר קרקעי, תוך שימוש במערכות נוספות לקליטת נתונים (כגון סורקי לייזר אוויריים ו-GPS). לטענתו, מכיוון שניתן לבצע חתכים מדויקים של המודל המתקבל מהסריקה, היעילות והאיכות של פרויקטי הבנייה עולות. הכותב מציג את התהליך הדרוש לבניית מודל תלת-ממדי מלא של בניינים, הכולל רגיסטרציה הן של הסריקות האוויריות והן של הסריקות הקרקעיות, תוך שימוש ב-GPS, לאחר מכן עריכת המודל התלת-ממדי והפקת ה-CAD, ולבסוף זיהוי האובייקטים.

3.2 שימוש בסורקי לייזר באתרי בנייה

בשנים האחרונות הופכות מערכות מיפוי מבוסס-לייזר לרווחות יותר ויותר; בין היתר גדל באופן טבעי השימוש בסורקי לייזר קרקעיים למידול תלת-ממדי של אתרי בנייה ולסיווג ענן הנקודות לאובייקטים שונים. המחקרים העיקריים נעשים בתחום הפיקוח וניהול הבנייה, נושאים של בטיחות בעבודה, מדידת דפורמציות, עבודות פיתוח, ועבודות חפירה.

3.2.1 פיקוח וניהול הבנייה

Gilsinn ואחרים (2004) השתמשו בסורקי לייזר על מנת לקרוא ולפענח ברקודים (barcodes) על אובייקטים באתרי בנייה. התהליך שהם מציעים הוא תחילה למצוא חומר ממנו כדאי להכין את הברקוד (חומר שמחזיר אור כדי שיהיה שונה מהרקע ושערכי עוצמת ההחזר שלו יהיו גבוהים), לאחר מכן סינון של מידע לא רלוונטי מהסריקה, ולבסוף עיבוד הנתונים ופענוח הקוד בעזרת המידע על עוצמת ההחזר (intensity). מטרת המחקר היא לזהות אובייקטים הנמצאים באתר בנייה בעזרת מדבקת ברקוד הנמצאת על האובייקט. Gordon ו-Akinci (2005) מבצעים הערכה איכותית בנוגע לתפעול סורקי לייזר קרקעיים וחיישנים קבועים אחרים (כגון חיישני טמפרטורה ומאמצים), הן מבחינה טכנולוגית והן מבחינת עיבוד הנתונים, לצורך פיקוח ובקרת איכות באתרי בנייה. לטענת הכותבים, הטכנולוגיות הקיימות מאפשרות הערכה מפורטת של מצב התשתיות תוך כדי התקדמות הבנייה, אך רוב המחקרים שנעשו עד כתיבת מאמר זה התמקדו בעיקר ביצירת תמונת מצב קיים, ולא באיסוף תדיר של מידע מאתר בנייה המתפתח באופן דינאמי. לשם הערכת תפעול סורקי הלייזר, נאספו נתונים בחמישה אתרי בנייה, בגדלים שונים ובעונות שונות, בין פעמיים לארבע פעמים בחודש בעזרת סורקי לייזר. בנוסף נאספו נתוני טמפרטורה בעזרת שלושה סוגים שונים של חיישני טמפרטורה. במאמר בודקים הכותבים איכותית את יעילות הסורקים תוך התחשבות במהירות איסוף הנתונים, בתדירות האיסוף, רמת פירוט הנתונים הנדרשת, כוח האדם הנדרש לתהליך המדידה, וכן במקום האחסון הנדרש לנתונים הנאספים.

כדי לא להפריע למהלך העבודה באתר, איסוף הנתונים נעשה לאחר שעות העבודה. לטענת הכותבים, ניתן להפעיל שני סורקי לייזר בו-זמנית, אך הם עלולים להשפיע קלות על המידע הנרכש. רגיסטרציית נתוני הלייזר נעשתה בעזרת ידע מוקדם בנוגע למיקומם המדויק של הסורקים בשטח, וכן בעזרת החפיפה הגדולה בין הסריקות. הכותבים מציינים כי ללא המידע בנוגע למיקומם המדויק של הסורקים, ארכה הרגיסטרציה זמן רב יותר, ודיוקה היה נמוך. הכותבים אומרים כי השימוש בסורקים מסוגים שונים לא שינה את אופי איסוף המידע, מלבד העובדה כי סורקים המבוססים על מדידת הפאזה היו מדויקים יותר, כצפוי, וכי סורקי הלייזר המבוססים על time-of-flight הצליחו לאסוף נתונים גם בטמפרטורות קיצוניות (מתחת ל- 6°C ומעל 32°C). הכותבים נתקלו במספר בעיות שנבעו מחוסר במקום אחסון וכתוצאה מכך בעיבוד הנתונים. למרות זאת, מדגישים הכותבים כי השימוש בסורקי לייזר קרקעיים מאפשר איסוף יעיל של מידע מרחבי באופן קבוע ותדיר, דבר העוזר רבות למנהלי הבנייה.

Gordon ואחרים (2005) מעריכים איכותית תוכנות לוויזואליזציה של מידע הנאסף לצורך בקרת איכות באתרי בנייה בעזרת סורקי לייזר קרקעיים וחיישני טמפרטורה, כהמשך למחקרם (Gordon and Akinci 2005). הכותבים מציינים את העובדה כי בעזרת השוואה בין המידע על הנעשה בשטח (as-built), המורכב מנתוני החיישנים והמידע הגיאומטרי, לבין תוכניות הבנייה, ניתן לבדוק האם הנעשה בשטח עומד במפרכי הבנייה.

לשם כך, עיבדו הכותבים נתונים שנרכשו באתר בנייה בעזרת סורק מסחרי ומדי טמפרטורה בחמש תוכנות מסחריות שונות לעיבוד נתונים תלת-ממדיים. הכותבים מדגישים כי טכנולוגיות הוויזואליזציה הקיימות ממלאות דרישות רבות, כגון: רגיסטרציה פשוטה, ניתוח ומניפולציה על

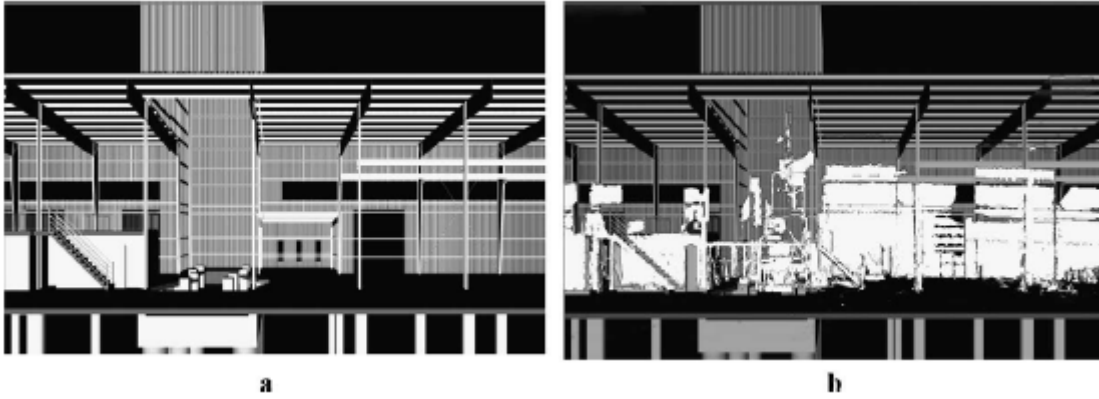
הנתונים, איתור סטיות, ודיווח עליהן, כל זאת בצורה נוחה למשתמש. יחד עם זאת הן עדיין אינן יעילות בעבודה עם קבצים גדולים, בצפיפות לא אחידה של נקודות, ובמידע הטרוגני. בנוסף, לא קיימת בהן התייחסות או חיווי בנוגע לכל השגיאות המצטברות בתהליך העיבוד, ומכאן שאין ביכולתן לספק תמונה מלאה של הנעשה בשטח. כמו-כן, ישנה בעיה בהצגת 4D (תלת-ממד וזמן) של תהליך הבנייה, ובהצגת מטה-דאטה (מיקום החיישנים, שגיאת החיישן, וכדו'). הכותבים מציינים גם את הצורך בהצגת מידע פיזי, כגון חוזק המרכיבים, כך שמידע הנרכש בשטח בעזרת חיישנים שונים יכול לעזור בבחינת מצב ה-as-built.

Akinci ואחרים (2006) טוענים כי עקב פיתוחן של טכנולוגיות למידול וחישה, ניתן למנוע פגמים בבנייה תוך כדי העבודה. אי-לכך, מציעים הכותבים דרך פעולה לפיקוח ולבקרת איכות באתרי בנייה באופן יעיל. לטענת הכותבים, נכון לזמן כתיבת המאמר, הגישות למדידה ולבקרת-איכות אינן יעילות, שכן הן מספקות מידע בזמן ובמקומות ספציפיים בלבד, ולא בנוגע לפרויקט בכללותו. בנוסף, המידע מעובד ידנית, ולא משולב דיגיטלית בתוכניות הבנייה. כתוצאה מכך, מנהלי הפרויקטים אינם מקבלים מידע מקיף ומדויק על העבודה בשטח, ופגמים רבים מאותרים רק בסוף הבנייה, כאשר העלויות לשינוי גבוהות מאוד, ולא במהלך העבודה.

הכותבים מציינים דרך פעולה המשתמשת בטכנולוגיית הלייזר לבקרת איכות בבנייה. התהליך מורכב מחמישה שלבים: (1) שילוב המודל המתוכנן במודל הסרוק, תוך פירוק למרכיבים השונים; (2) זיהוי האובייקטים בשטח אותם יש לבדוק; (3) תכנון מהלך הפיקוח באתר (שחלקו מציאת המקומות האופטימאליים להצבת סורקי הלייזר); (4) איסוף נתוני as-built בעזרת סורקי לייזר; ו- (5) ניתוחם בעבור בקרת איכות.

הכותבים מציינים כי גם השלבים הקודמים לשלב איסוף הנתונים חשובים, שכן סוג הסרוק, רזולוציית הסריקה, ומיקום הסורק תלויים באובייקטים הנבדקים ובדיוק הנדרש לבדיקתם. ניתוח נתוני הלייזר בעבור בקרת איכות מורכב משלושה שלבים: (1) עיגון ענן הנקודות שהתקבל מהסרוק למודל המתוכנן; (2) זיהוי ואיתור אובייקטים חופשיים בסצנות תלת-ממדיות בעזרת שיטות מוכרות בראייה ממוחשבת; ו- (3) איתור פגמים וסטיות מהמודל. הסטיות נמצאות תוך השוואת הנתונים המעובדים שנתקבלו מהסרוק למודל המתוכנן והפגמים מוגדרים בתור סטיות שחורגות מהגדרות הבנייה שניתנו מראש (ר' איור 1-3).

הכותבים בדקו את רצף הפעולות על ארבעה פרויקטים בגדלים שונים ומסוגים שונים בעזרת תוכנות מסחריות הקיימות בשוק. הם מסיקים כי מהלך העבודה המוצע כללי מספיק ומתאים לבקרת איכות ברמות מורכבות שונות, ובמקרים מסוימים הביא להעלאת היעילות בבדיקה (צמצם את מספר הדברים שיש לבדוק).



איור 3-1 דוגמא לסטיות שנמצאו בין המודל המתוכנן לסרוק. (a) המודל המתוכנן; (b) שילוב של המודל המתוכנן וה-as-built כאשר הסטיות מהתכנון מודגשות בלבן (Akinci ואחרים 2006)

Boukamp ו-Akinci (2007) מציגים שיטה לפיקוח ובקרת איכות של פרויקטים אל מול מפרטי הבנייה. דבר זה יכול לתרום גם לבקרת נזקים במהלך העבודה. השיטה אותה מציעים הכותבים מבוססת על דרך הפעולה שהותוותה על ידי Akinci ואחרים (2006) (רי לעיל). לכל פרויקט בנייה מפרטים מסובכים, הנוגעים לתחומים שונים בפרויקט (מפרטי מים, חשמל, קורות). מפרטים אלה קשורים ומשפיעים זה על זה, ולכן העבודה עמם עלולה להיות מסורבלת ומלאה טעויות. מכיוון שמפרטים אלה קובעים את הפרטים אותם יש לבדוק במהלך הפיקוח באתר, הבנת הקשרים ביניהם תביא לייעול תהליך הפיקוח והבדיקה בזמן הבנייה. עקב השימוש ההולך וגדל בסורקי לייזר באתרי בנייה, מציעים הכותבים לקבל מידע על הנעשה בשטח בעזרת טכנולוגיה זו ולהשוותו למודל המתוכנן (as-planned), בו משולבים כלל מפרטי הבנייה והדרישות הנובעות מהם. ההשוואה, בעזרתה יוגדרו האובייקטים שצריכים להיות תחת פיקוח, נעשית בעזרת מפת סטיות (deviation map), בה מסומנות הסטיות בין הנעשה בשטח (as-built) ובין המתוכנן (as-planned). האובייקטים שייבדקו הם אלו להם ערך הסטייה במפת הסטיות הקרוב ביותר לערכים המותרים על פי המפרטים הרלוונטיים. זאת בדומה לשלב האחרון שהוצע על ידי Akinci ואחרים (2006).

במאמר שמים הכותבים דגש על שילוב המפרטים בתוכניות הבנייה, כך שניתן יהיה לפענחם באופן אוטומטי ולקבל את המידע הדרוש, קרי אילו אובייקטים יש לבדוק. יש לציין כי הכותבים אינם מציינים כיצד נמצאות ומחולצות הסטיות. השיטה נבדקה הן בעזרת נתונים סינתטיים והן על מספר בניינים רבי-קומות. מכיוון שרוב העבודה באתרי בנייה נעשית על מבני בטון, הכותבים התמקדו בבדיקת מבני בטון יצוק, כך שניתן היה לשלב מפרטי בטון בתוך הפרויקט. זאת משום שעדיין לא ניתן להציג את האינפורמציה בכללותה על מודל הפרויקט.

Bosche ו-Haas (2008) מציגים שיטה אוטומטית וחסונה (robust) לזיהוי וחילוץ אובייקטים תלת-ממדיים מתוך ענני נקודות שנרכשו בעזרת סורקי לייזר לצורך ניהול הנדסי. לפי הכותבים, השיטות המקובלות בתחום לזיהוי אובייקטים הן שיטות מבוססות-מודל, דהיינו, הן מתבססות על ידע מוקדם בנוגע לאובייקט הרצוי (צבע, צורה, טמפרטורה, וכדומה) או על השוואה בין רשתות פוליגונאליות דו-ממדיות (polygonal surface meshes) של התמונה ושל האובייקט. שיטות אלו מוגבלות ובעלות סיבוכיות חישובית גבוהה. הכותבים מציעים להפוך את מודל ה-CAD של

הפרויקט המתוכנן לענן נקודות המעוגן במערכת הכדורית של סורק הלייזר. לשם כך, הם מציעים לחשב בעבור כל נקודה בענן ה-as-built הסרוק את הנקודה המתאימה לה בענן ה-as-planned מתוך מודל ה-CAD, זאת על-ידי התמרת המודל לפורמט בו הוא מיוצג כאוסף משולשים. נקודת ה-as-planned שייכת לנקודת ה-as-built כאשר לשתייהן אותן זוויות הרכנה. מיקום נקודת ה-as-planned על מודל ה-CAD מחושב לפי נקודת חיתוך הקרן עם המשולש הקרוב ביותר. כלומר: כדי למצוא את נקודת ה-as-planned יש להטילה על מישור בכיוון הקרן של נקודת ה-as-built. למאפייני נקודת חיתוך זו מצורף שם האובייקט על פניו היא נמצאת, כך שניתן למיין את הנקודות לפי האובייקטים.

הכותבים בדקו את השיטה על שני ניסויים. האחד בוצע על מבנה דמוי עמודים וגג (column-slab), שנבנה בתחילה כמודל CAD, ונסרק בעזרת סורק לייזר קרקעי. הניסוי השני נעשה על אותו מבנה, אך נבדק מספר פעמים במהלך הבנייה, כדי לבדוק האם ניתן, בעזרת השיטה, לעקוב אחר התהליך. הכותבים מציינים כי למרות שהשיטה בה השתמשו בסיסית ביותר, תוצאות הניסוי מצביעות על הפוטנציאל הגלום בה לצורך מעקב אחר התקדמות הבנייה. יש לציין כי מכיוון שבשיטה המוצעת יש צורך בערכי סף שונים, לצורך זיהוי האובייקטים, הכותבים מציינים גם שיטות לקביעתם.

Bosche ואחרים (2009) מציעים שיטה לזיהוי אובייקטים באתר בנייה בעזרת שימוש בסורקי לייזר קרקעיים ומודל CAD של האתר. זאת כבסיס לבקרת התקדמות והתרשמות ויזואלית. השיטה המוצעת מאפשרת בקרת התקדמות, מעקב אחר פיריון, ובקרת איכות כמותית ואיכותית. הכותבים מציינים כי בשיטות הרווחות כל אובייקט מזוהה בנפרד, ולכן הן אינן חסונות דיין לצורך עיבוד סצנות מורכבות, בהן קיימות הסתרות אובייקטים. לפיכך, מציעים הכותבים חיפוש בכל המודל, בו-זמנית, על-מנת לזהות את האובייקטים התלת-ממדיים שבו.

המודל אותו מציעים הכותבים זהה למודל שהוצג על ידי Haas ו-Bosch (2008), אך עם שיפורים בזיהוי נקודות ה-as-planned וזיהוי האובייקט. מכיוון שלנקודות ה-as-built וה-as-planned אותן זוויות הרכנה, הרי שיש להשוות רק את המרחק ביניהן. בהינתן ערך סף מקסימאלי למרחק, אם נקודה קטנה ממנו – הרי שהיא מזוהה. בניסוי המוצג, היה ערך זה 79.6 מ"מ – שנמצא לפי

$$\Delta \rho_{\max} = \overline{\epsilon_{reg}} + \epsilon_{const.} = 29.6 + 50 = 79.6_{mm}$$

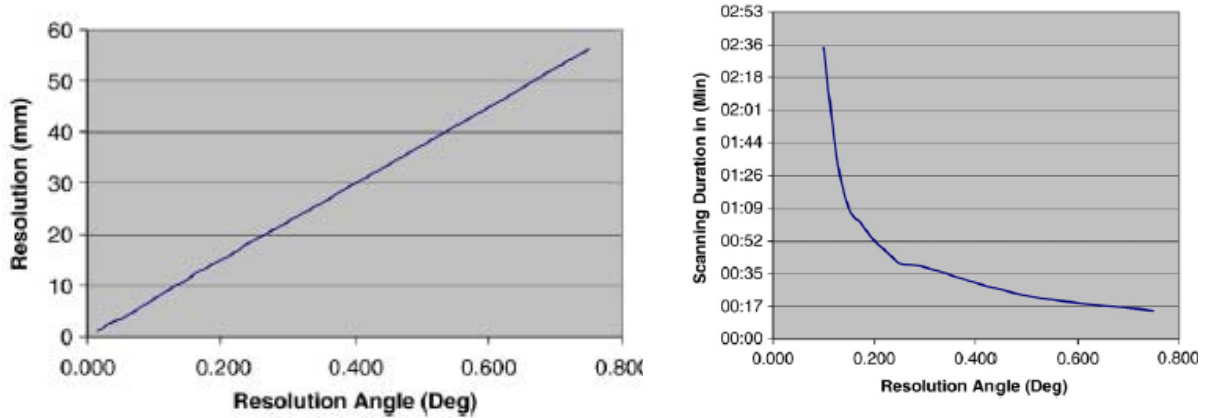
$\Delta \rho$ - ערך מקסימאלי למרחק; $\overline{\epsilon_{reg}}$ - שגיאת הרגיסטרציה; $\epsilon_{const.}$ - שגיאה מקסימאלית משוערת של הפרויקט הבנוי).

כמו כן, מחושב ערך נוסף התלוי ברזולוציית הסריקה $(Res_{\varphi}, Res_{\theta})$, מרחקה המקסימאלי מהמודל הנסרק $(Model \cdot \rho_{\max})$, ומספר הנקודות שעל המשטח המזוהה (n) , לפי:

$$Surf_{\min} = n \tan(Res_{\varphi}) \tan(Res_{\theta}) (Model \cdot \rho_{\max})^2$$

מול ערך סף זה (בניסוי המוצג, הערך שהתקבל הוא 0.0109 מ"ר) נבדק האם האובייקט זוהה במלואו. בדיקה זו נעשית מול תוצאת הסכימה המשוקללת של גודל "איזור הכיסוי" של הנקודות שעל משטח האובייקט המזוהה. איזור הכיסוי של כל נקודה מחושב באופן גס כגבול הנמצא במרחק שווה בין הנקודה לבין שכנותיה, שזוהו על גבי המשטח. גבולות אלו מחושבים כתלות ברזולוציה הזוויתית של הסריקה, במרחק אל הנקודה בענן ה-as-planned, ובזווית הנוצרת בין נורמל המשטח לכיוון הסריקה. הכותבים בחנו את השיטה המוצעת בארבעה אתרי בנייה שונים ומצאו כי היא יעילה מבחינה חישובית ומאפשרת חיווי ויזואלי של אתרי בנייה.

El-Omari ו-Moselhi (2008) מציעים שיטה לשילוב פוטוגרמטריה וסריקות לייזר קרקעיות לצורך מעקב אחר ההתקדמות באתרי בנייה. לטענת הכותבים, שילוב מעין זה מגביר את מהירות איסוף המידע באתרי בנייה ומעלה את דיוקו. הכותבים מציינים את מגבלות השימוש בכל אחת מהשיטות לבדן: איסוף הנתונים שנסרקים בעזרת סורק הלייזר ברזולוציה גבוהה אורך זמן רב ודורש עמדות סריקה רבות להשגת אינפורמציה בדיוק גבוה; בשיטות הפוטוגרמטריה, קיים צורך לפזר מטרות רבות על גבי האובייקטים כדי לייצר אינפורמציה מספקת לצורך תיאור תלת-ממדי של האובייקטים בשטח. שילוב מידע תמונתי בסריקות הלייזר יכול להשלים את המידע הנרכש ולאפשר קביעת טקסטורה וצבע של אובייקטים, בעוד שסריקות הלייזר מספקות מידע גיאומטרי מהימן יותר כאשר הטקסטורה כמעט ולא משתנה. הכותבים מציעים לשלב בין ענן הנקודות והסריקות בעזרת איתור נקודות עניין, כגון פינות, אותן ניתן לזהות גם בסריקה וגם בתצלומים. בדרך זו, המודל גמיש דיו לאתרי בנייה, בהם לא ניתן לפזר מטרות, וכן ישנו חסכון בזמן איסוף המידע (אין צורך לפזר מטרות באתר). לשם חיסכון נוסף בזמן, ומכיוון שישנם תצלומים שישלימו מידע, הסריקה יכולה להיעשות בזוויות רזולוציה גדולות, וממספר מועט יחסית של עמדות סריקה, בהתחשב בדיוק הנדרש. לצורך בדיקת המודל נסרקה וצולמה (לאו דווקא מאותן עמדות) ערימת קופסאות במעבדה, והנפח הידוע מראש חושב בשלוש דרכים: בעזרת תצלומים בלבד; בעזרת ענן נקודות בלבד, שנרכש ברזולוציות שונות (החל מרזולוציית סריקה זוויתית של 0.015° וכלה ב- 0.75°); ועל-ידי שילוב ביניהם. הכותבים מציינים כי היה קשה לזהות את גבולות הקופסאות מתוך ענני הנקודות, גם ברזולוציות הגבוהות (0.015° ועד 0.2°), כך שהתקבל נפח בטעות של $+2\%$ ברזולוציית סריקה של 0.015° , ו- 4% ברזולוציית סריקה של 0.2° . לעומת זאת, כאשר שולבו ענני נקודות אלו עם תמונות, זיהוי הגבולות היה פשוט יותר וכתוצאה מכך התקבלה טעות של פחות מ- 1% . לצורך בדיקה נוספת נעשה ניסוי באתר בנייה קיים, שגודלו 60 מ' X 40 מ', בו נמדדה ההתקדמות בסוף כל יום עבודה, כאשר הסריקות נעשו ברזולוציה זוויתית קבועה של 0.2° , שכן זו נמצאה כטובה דיה, הן מבחינת זמן הסריקה והן מבחינת דיוק התוצאות (ר' איור 2-3), בניסוי המקדים. בעזרת תוכנה מסחרית (PHIDIAS), אוחדו הסריקות והתצלומים, בשימוש בנקודות עניין (common points). נמצא כי בשל השילוב עם תצלומים נחסך זמן רב בסריקה בשטח, וכן התאפשרה הוצאת מידע חשוב ויעיל בזמן בנוגע להתקדמות העבודה באתרי בנייה בסוף כל יום עבודה.



איור 3-2 תוצאות הניסוי המקדים: רזולוציה מתקבלת בזמן סריקה כתלות ברזולוציית הסריקה הזוויתית (2008 Moselhi ו- El-Omari)

3.2.2 מדידת דפורמציות במבנים

Gordon ו-Lichti (2007) מציעים שיטה למדידת הזזות אנכיות בקורות מעוותות בעזרת סורקי לייזר קרקעיים בעלי דיוק-גס (coarse-precision). הכותבים טוענים כי השיטות הקיימות, עד לזמן כתיבת המאמר, עונות על חלק מהדרישות למדידת הסטות בקונסטרוקציות, כגון דיוק גבוה, עלות נמוכה, וקלות שימוש, אך יש להן חסרונות רבים, כמו הצורך במגע עם האובייקטים הנמצאים באתר והבעייתיות בהפקת מידע תלת-ממדי. לעומתם, סורקי הלייזר הקרקעיים נוחים לשימוש, אינם דורשים מגע עם האובייקטים, וניתן לחלץ מהם מידע תלת-ממדי בקלות יתירה. הכותבים מציעים שיטה למדידת הזזות אנכיות בקורות המבוססת על מכאניקה הנדסית. לכל קורה מתואם עקום בשיטת constrained least-squares. מתוך הנוסחאות לחישוב הזזת קורה הנסמכת על שני סמכים פשוטים, במקרה של עומס יחיד, מתקבלים שני פולינומים המתארים את הקורה. שלושה אילוצים נכפים בתהליך תיאום הקורה, והם: (1) רציפות בהזזה, (2) רציפות בנקודת העומס, ו-(3) רציפות מומנט הכפיפה בנקודת העומס. הערכת דיוק הפרמטרים המתואמים נקבעת בעזרת מבחנים סטטיסטיים.

לצורך בדיקת השיטה הועמסו שתי קורות, האחת מעץ והשנייה מבטון, בעומסים שונים במעבדה, ונסרקו בעזרת שני סורקי לייזר קרקעיים, בעלי דיוק טווחים שונים (Cyra Cyrex 2500 לו דיוק טווח של ± 4 מ"מ ודיוק קואורדינאטות של ± 6 מ"מ ו-Riegl LMS-Z210 לו דיוק טווח של ± 25 מ"מ, אך הוא רוכש נקודות במהירות גבוהה יותר). לצורך בקרה, צולמו הקורות למדידות פוטוגרמטריות. הכותבים מציינים כי סורקי הלייזר הוצבו מעל הקורה, לא מפולסים אך יציבים, זאת כדי להדגיש את נוחות הצבת המכשיר בשטח.

שימוש בסורקים הוכיח עצמו כמדויק, ברמת דיוק של תת-מילימטר (בשימוש ב-Cyra Cyrex 2500), עם יתרון של ייצוג המשטח בכללותו, ללא ממד חלש (כמו ממד העומק בפוטוגרמטריה), וללא הצורך במטרות באתר. דיוק קביעת עיוותי הקורה ב-Cyra Cyrex היה טוב יותר, כצפוי, וכי

מסיבה לא ברורה נתקבלו תוצאות טובות פחות במדידת קורת העץ לעומת הבטון בשני סוגי הסורקים.

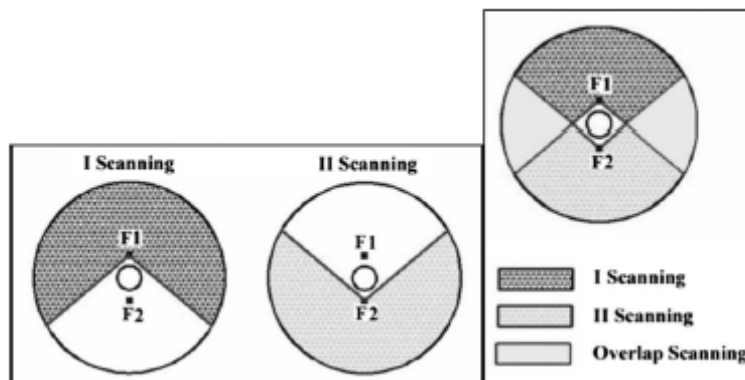
Sarti ואחרים (2009) מתארים מדידות שנעשו במראה הראשית של טלסקופי Very long baseline interferometry telescopes (VLBI) כדי למצוא דפורמציות הנוצרות בה עקב כוח המשיכה, כמו גם מדידת גודל השינוי היחסי באורך הפוקאלי של הטלסקופ עקב השינוי בזוויות הגובה של האנטנות. טלסקופים אלו משמשים למדידות גיאודטיות, ודיוק התצפיות שנעשות בהם חשוב. סטיות בין התצפיות האסטרונומיות לתצפיות מקומיות מובילות להשערה שישנן דפורמציות הנוצרות עקב כוח המשיכה. לשם מציאת הדפורמציות נעשו מדידות הן בעזרת סורק לייזר קרקעי והן בעזרת מכשירי total station, כך שניתן היה להשוות בין אפקטיביות השימוש בסורק לייזר למציאת דפורמציות מזעריות ובין השימוש ב-total station.

לשם מציאת הדפורמציות בוצעו סריקות משתי עמדות שונות (ר' איור 3-3). מתוך ענני הנקודות שנסרקו חושב בעזרת least-squares adjustment פרבולואיד-סיבוב, שקדקודו בראשית, והוא מתואר לפי:

$$Z = \frac{X^2 + Y^2}{4f}$$

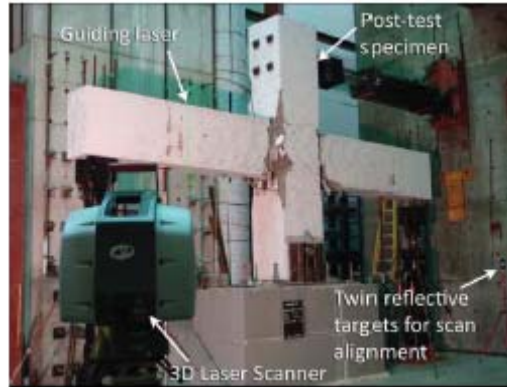
כאשר f הוא אורך המוקד.

פרבולואיד הסיבוב תואם בזוויות גובה שונות, תוך הוצאת נקודות שנמצאו חורגות מערכי סף קבועים מראש (לא יותר מ-5 מ"מ). שני הטלסקופים שנמדדו הגיבו באופן דומה לכוח המשיכה: גודל הדפורמציות בזוויות הגובה השונות היה דומה, וגודל השינוי באורכים הפוקאליים של הפרבולה היו דומים הן מבחינת גודל והן מבחינת סימן. אלה חושבו מתוך נתוני הסריקה בלבד. הכותבים מסכמים כי ניתן להשתמש בסורקי הלייזר למדידה מדויקת מאוד של השינויים באורכים הפוקאליים (עד לרמת דיוק של $\pm 0.0001\text{m}$).



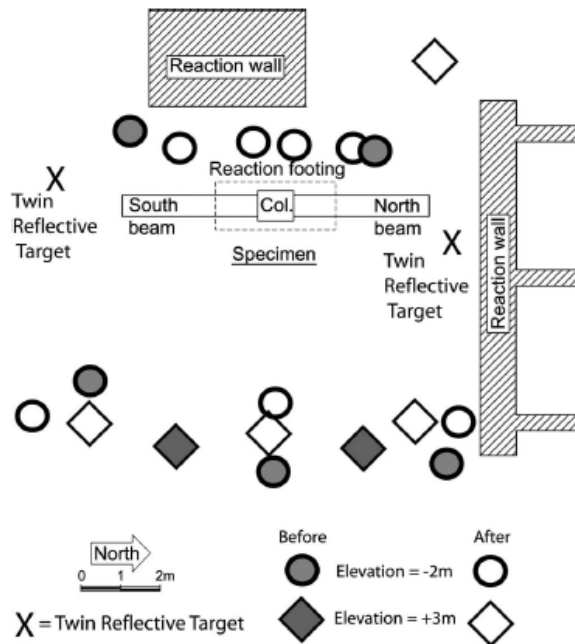
איור 3-3 דוגמה למיקום נקודות הסריקה בשש זוויות הגובה השונות (Sarti ואחרים 2009)

Olsen ואחרים (2010) מציעים שימוש בסורק לייזר קרקעי לצורך זיהוי נזקים ושינויי נפח בקנה מידה מלא. במקומות בהם ישנה פעילות סיסמית גבוהה, מבני מסגרות נדרשים לעמוד בתקנות מחמירות, הגורמות לעיכוב וסרבול בעבודה. אי-לכך נעשים ניסיונות למצוא אפשרויות חדשות למבני מסגרות, שיעמדו בתקנות ויקטינו את הנזק שיגרם בעת פעילות סיסמית, בעיקר באזורי החיבורים של מבנה המסגרת. אחת מההצעות היא בנייה מאלמנטים טרומים: עמוד בטון בחתך $0.76 \text{ מ' X } 0.92 \text{ מ'}$, אליו מחוברות שתי קורות בחתך $0.56 \text{ מ' X } 0.95 \text{ מ'}$ (רי איור 3-4). בגלל גודל הדגימה, ובגלל הנזק המקומי המיוחד הצפוי בו כתוצאה מהניסוי, עלה הרעיון להשתמש בסורק לייזר קרקעי, בנוסף לשימוש בחיישנים שונים ולתיעוד הפיזי (רשומות, תצלומי וידאו וסטילס).



איור 3-4 הצבת הניסוי: הקורה המורכבת וסורק הלייזר הקרקעי (Olsen ואחרים 2010)

הסריקות בוצעו לפני ואחרי ניסוי ההעמסה, ממספר עמדות (רי איור 3-5), כך שבסוף כל מקבץ סריקה נעשתה רגיסטרציה בעזרת תוכנה מסחרית (Leica's Cyclone Software או I-Site Studio). לצרכי ביקורת במהלך הניסוי, נצבעו סדקים שנוצרו במשטח הבטון, וכל הדגימה צולמה. בסוף הניסוי, רבים מהחלקים הצבועים התנפצו לרסיסים. אלו נמדדו ידנית ונפחם חושב.



איור 3-5 מיקומי הסורק לפני ואחרי ניסוי ההעמסה (Olsen ואחרים 2010)

חישוב השינוי בנפח נעשה לפי השלבים הבאים: (1) חלוקת הסריקה לרכיבים (במקרה זה לשלושה: העמוד המרכזי, הקורה הצפונית, והקורה הדרומית); (2) סינון רעשי רקע: כל רכיב חולק לקוביות בעלי אורך צלע של 1 ס"מ, ומרכזי הכובד שלהן חושבו, כאשר בעזרת מרכזי הכובד נעשה מיצוע של רעשי המדידה מתוך המדידות שנעשו לכל קובייה; (3) חישוב חתכים בכל רכיב: בקורות הוצאו חתכים במישור XZ , כך שהמרווח ביניהם הוא כל 1 ס"מ בציר Y , ואילו בעמוד המרכזי היו החתכים במישור XY , כך שהמרווחים ביניהם היו כל 1 ס"מ בציר Z ; כל חתך נערך בנפרד כדי להסיר ממנו פיקסלים מעורבים (mixed pixels) ונקודות של חתיכות בטון מרוסק שעדיין לא נפלו – בצורה זו ניתן היה לבנות מודל מלא של האזור שלא נפגע כלל; (4) בעזרת convex hull נבנה פוליגון חוסם לכל חתך, ושטחו חושב לפי:

$$A = \sum_{i=1}^{j=n-1} \vec{v}_{0,i} \times \vec{v}_{0,i+1}$$

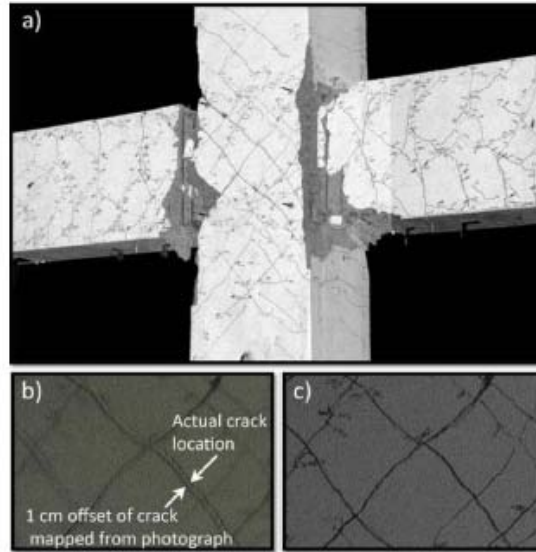
כאשר: A הוא שטח הפוליגון; n – מספר הקודקודים; $\vec{v}_{0,i}$ הווקטור מהקודקוד הראשון לנוכחי. נפח הרכיב חושב בעזרת:

$$V = \sum_{j=1}^{j=N} A_j \times t_j$$

V – נפח הרכיב; j – הלולאה הנוכחית או החתך; N – מספר החתכים; A_j שטח החתך ה- j .

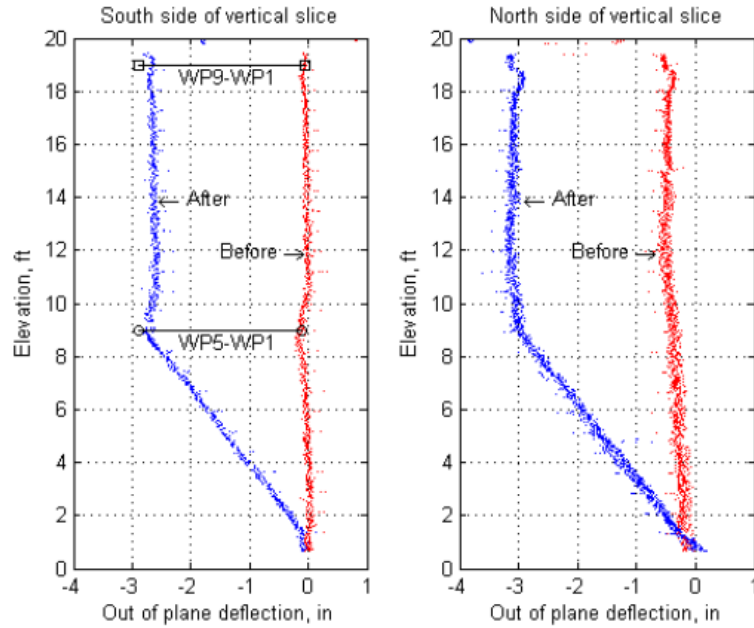
השינוי בנפח חושב לפי ההפרש בין הנפח לפני הניסוי והנפח לאחר הניסוי (הנפח לאחר הניסוי חושב בצורה דומה, בעזרת חתכים). לשם אימות חישובי הנפח, נעשה שימוש גם בשיטות למציאת שינוי משטחים בעזרת תמונות (surface change methods). נמצא כי תוצאות שתי השיטות תואמות, בקירוב. לשם מיפוי הסדקים נבנתה מפת עוצמות (Intensity map) ששולבה עם הסריקות ותמונות שצולמו בעת הסריקה, בעזרת מצלמת הסורק. מכיוון שהסריקה הייתה קרובה יחסית לדגימה, נוצרה בעיית פרלקס (שכן אין המצלמה והסורק ממוקמים באותו המקום) ונוצר הבדל במיקום קו הסדק (ראה איור 6-3). לכן, בסופו של דבר, השתמשו הכותבים במפת העוצמות בלבד, שנתנה אינדיקציה ברורה למיקום הסדקים.

לסיכום, אומרים הכותבים, השימוש בסורק קרקעי מאפשר ניתוח אפקטיבי לחישוב השינוי בנפח ומדגיש במהירות את הנזקים.



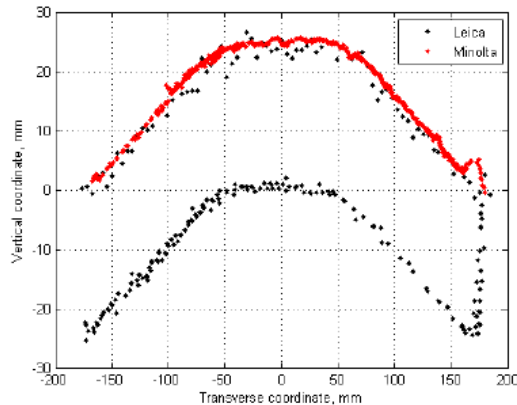
איור 3-6 מיפוי סדקים בקורה המורכבת בעזרת סורק לייזר: (a) מפת העוצמות; (b) צילום המראה את השפעות הפרלקס במיפוי תצלומים לנתוני הלייזר; (c) אזור (b) ובו המיקום הנכון של הסדקים, כפי שנראה במפת העוצמות (Olsen ואחרים 2010)

Takhirova (2010) מתאר שלושה ניסויים בהם נעשה שימוש בסורק לייזר קרקעי לתיעוד ואמידת נזקים הנגרמים כתוצאה מרעידות אדמה בבניין ובמרכיביו. בניסוי הראשון נבדקה תגובתו של בניין עץ דו-קומתי לרעידת אדמה מבוקרת. לצורך צמצום נתוני הסריקה נבנו קונטורים המראים את סטיות הקיר מהמישור כל 4 אינץ' (כ-10 ס"מ) וכן הוצאו חתכים אופקיים ואנכיים מתוך ענני הנקודות, לפני ואחרי הניסוי. החתכים האופקיים הוצאו בשני גבהים (בגובה התקרות של הקומות הראשונה והשנייה), ואילו החתך האנכי היחיד נעשה במקביל לאחד הקירות של הבניין. תוצאות מיקום הקירות בכל חתך, לפני ואחרי הניסוי, הושאו בסביבת Matlab (ר' איור 3-7). הכותב מציין כי במהלך הניסוי נעשה שימוש באמצעים קונבנציונליים (WP: wire pots position transducer) למדידת ההזזות של הקירות וכי הייתה קורלציה גבוהה בין תוצאות ה-WP לבין התוצאות שהתקבלו מתוך נתוני הלייזר.



איור 3-7 סטיות בקירות הדרומי והצפוני לפני ואחרי מבחן רעידת האדמה (2010 Takhirov)

הניסוי השני נערך על קורת I שחבורה לבסיס בטון, כשבקצה הופעל כוח גזירה. הדפורמציות נמדדו בעזרת שני סורקי לייזר, אחד ארוך-טווח (Leica Scan Station 2) והשני קצר-טווח (Konica-Minolta Vivid910), וכן בעזרת כלים קונבנציונליים (position transducers). גבהי הנקודות שהתקבלו בכלים הקונבנציונליים היו קרובים מאוד לנתונים שהתקבלו בעזרת הסורק קצר-טווח, אך תמיד נמוכים יותר. עובדה זו נובעת, ככל הנראה, מכך שמיקום המתמר היה קבוע לאורך הניסוי והתנועה שנקראה הייתה של הכבל הקשור לקצה בורג העיגון. במצב כזה ההזזה שנמדדת בעזרת המתמר תמיד פחותה מההזזה האמיתית. מכאן הסיק הכותב כי מדידת ההזזות בעזרת סורק לייזר מדויקת יותר. עוד מציין הכותב כי בהשוואת סריקות הלייזר שנעשו בעזרת הסורק ארוך-טווח לסריקות שנעשו בעזרת הסורק קצר-טווח התקבלו תוצאות דומות (רי איור 3-8). מתוך ניסוי זה הסיק הכותב כי ניתן להשתמש בסורקי לייזר ארוכי-טווח גם בעבור אובייקטים יחסית קטנים.



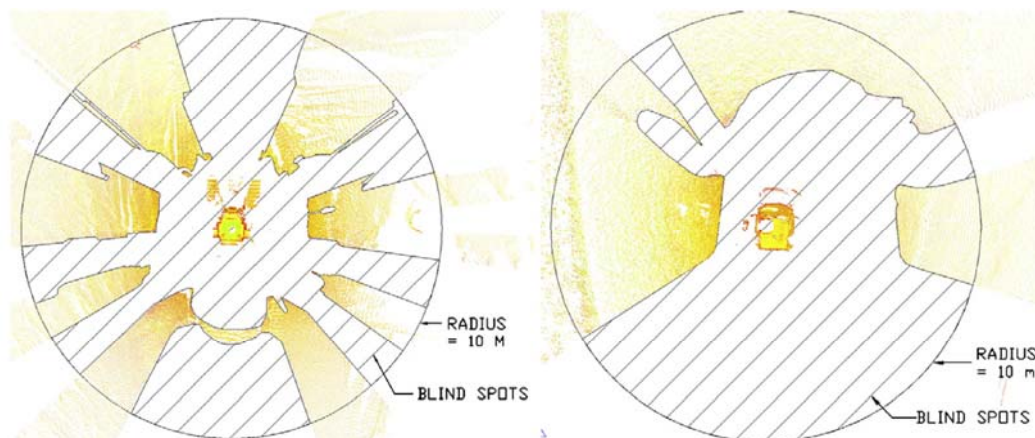
איור 3-8 השוואה בין החתכים שנעשו מתוך נתוני סורק קצר-טווח (Konica-Minolta Vivid910) וסורק ארוך-טווח (Leica Scan Station 2) (2010 Takhirov)

בניסוי השלישי, בו נבדקה תגובה לעומס סיסמי, הנתונים שנתקבלו מסריקות לייזר היו דומים מאוד לנתונים שהוקלטו בעזרת הכלים הקונבנציונליים במהלך הניסוי. הכותב הדגיש כי השימוש בסורקי לייזר יכול לעזור בשיפור מידול האלמנטים הסופיים (finite elements), שכן הוא מספק השוואה מדויקת של המשטחים המעוותים. את ההשוואה, הוא מציין, ניתן לבצע הן בעזרת סריקות "לפני" ו"אחרי" והן בעזרת סריקות המתבצעות במהלך כל הניסוי.

3.2.3 איתור בזמן אמת לצורך בטיחות בעבודה

שימוש בסורק לייזר למידול אזרחי נראות מתואר על ידי Teizer ואחרים (2010a) ובו מציעים הכותבים שיטה אוטומטית למדידת "שטחים מתים" של ציוד בנייה כבד באמצעות סורק לייזר. בשיטה המוצעת מאותרים ונקבעים השטחים המתים של הציוד באופן תלת-ממדי ובמהירות מתוך ענן הנקודות המתקבל מסריקת לייזר המבוצעת מתא המפעיל. השימוש בסורק הלייזר נעשה על-מנת לאפיין גיאומטרית את כלי הרכב. לצורך יישום השיטה פותחו אלגוריתמים למציאת שטחים מתים מרחביים ודו-ממדיים: הכותבים מציעים לחלק את מרחב הסריקה לתאים תלת-ממדיים. לאחר מכן נבדק מספר הנקודות בכל תא: אם תא מכיל מעל מספר מסוים (שנקבע מראש) של נקודות מענן הנקודות, הוא מוגדר כעצם קשיח, וכל התאים שאחריו, כולל התא עצמו, מסווגים כתאים בשטח מת. ייצוג השטחים המתים הוא חתך דו-ממדי בעל ערך Z כלשהו (ר' איור 9-3), כך שניתן לתאר את השטחים המתים הקיימים בגבהים השונים. הכותבים מציינים כי ניתן גם לדמות תזוזה של המפעיל בתוך כלי העבודה, תוך התמרת ראשית הסריקה למיקום אחר. חלוקת המרחב לוווקסלים (voxels) מתעלמת מאופי הכיסוי הפנורמי והשוני בצפיפויות הסריקה המאפיין סורקים קרקעיים, ולפיכך מציעה פתרון מוגבל.

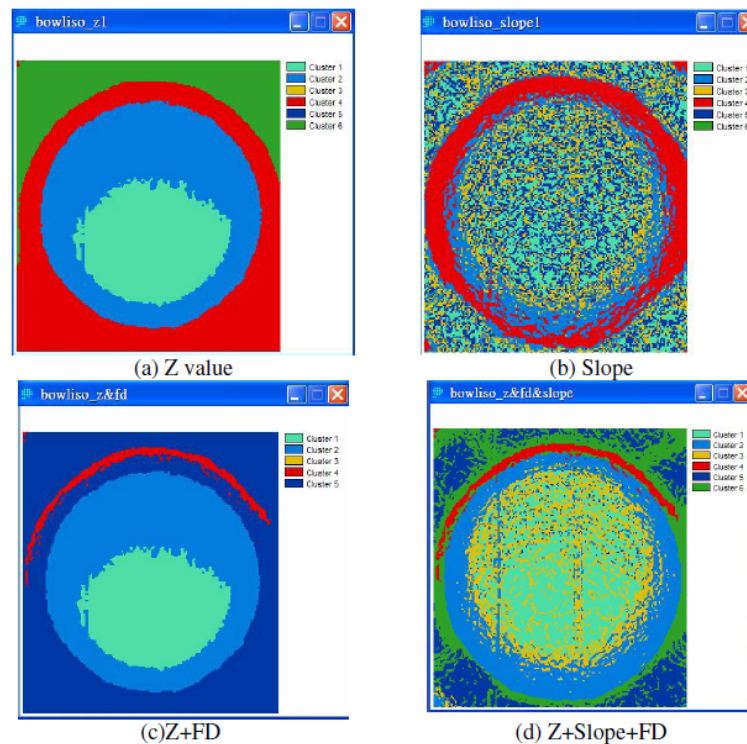
Teizer ואחרים (2010b) משתמשים בשיטה המוצעת על ידי Teizer ואחרים (2010a) לצורך שילובה במערכת המתריעה אוטומטית בעת קירבה יתירה בין ציוד כבד ופועלי בניין.



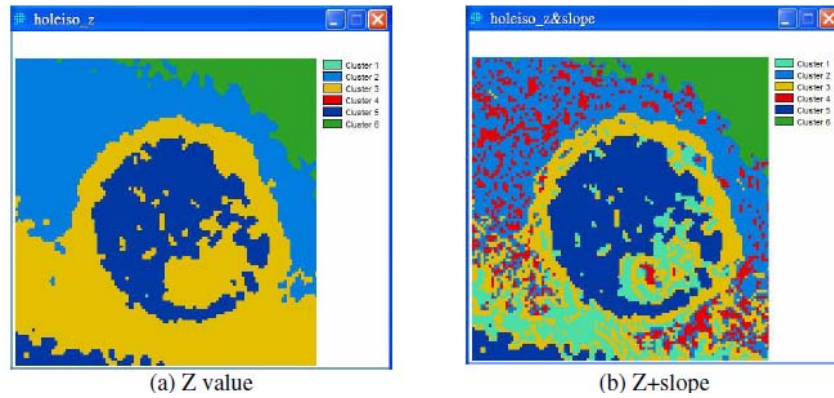
איור 9-3 תאור השטחים המתים (על ידי הקווים האלכסוניים) בגובה הקרקע בעבור שני כלים שונים (Teizer ואחרים 2010)

3.2.4 שימוש בנתוני לייזר לצורך עבודות פיתוח

Chang ואחרים (2005) מציעים שיטה מבוססת-רשת (grid-based) לאיתור נזקים במדרכות (כגון בורות וסדקים). ישנו צורך לאתר נזקים במדרכות, שכן ללא טיפול, מצב המדרכה מתדרדר במהירות. הדרך המקובלת כיום לזיהוי נזקים כאלה היא בצורה ויזואלית, אך זוהי שיטה סובייקטיבית ולביצועה נדרש כוח-אדם רב. מכיוון שסורקי לייזר קרקעיים מאפשרים רכישה של מידע תלת-ממדי מדויק, מוצע שימוש לצורך איתור הנזקים. הכותבים מציעים שיטת סגמנטציה המותאמת למאפייני מדרכות, כגון זיהוי בורות. בתחילה מחולצים מתוך ענן הנקודות מאפיינים טופוגרפיים כגון שיפועים, קו פרשת המים, וטקסטורות של הממד הפרקטלי (textures of fractal dimension). לאחר מכן, מבוצע תהליך הקבצה המבוסס על עיקרון ההומוגניות, על-פי המאפיינים שחולצו בשלב הקודם. השיטה נבדקה על סט נתונים סינתטי ועל נתוני אמת. ההקבצה נעשתה לפי מספר מאפיינים: אורדינאטה Z , שיפוע, ממדים פרקטיים, והשילובים ביניהם. מתוך ניסיונות אלו נמצא כי רק כאשר ההקבצה נעשתה לפי אורדינאטה Z , הבורות אותרו (ר' איור 3-10 ואיור 3-11). מצד שני, כאשר ההפרשים בגובה היו קטנים, לא ניתן להשתמש במאפיין זה כקריטריון. הנזקים במדרכות מזוהים בקלות מתוך הנתונים המתקבלים, תוך הערכת גודל ונפח הנזק, דבר המסייע בהערכת כמות החומרים הנדרשת לתיקון.

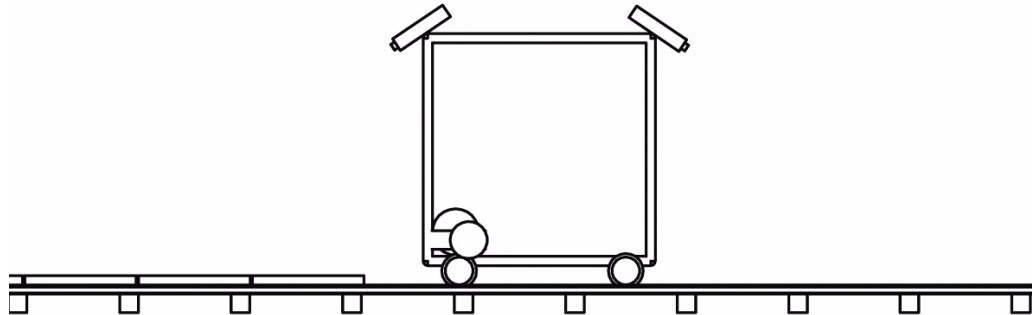


איור 3-10 איתור נזקים במדרכות: תוצאות ההקבצה לפי מאפיינים שונים בנתונים הסינתטיים (Chang ואחרים 2005)



איור 3-11 איתור נזקים במדרכות: תוצאות ההקבצה לפי מאפיינים שונים בנתונים האמיתיים (Chang ואחרים 2005)

Walters ו-Jaselskis (2005) מתארים מערכת המורכבת מקרונית ועליה זוג סורקי לייזר דו-ממדיים בעזרתם ניתן למדוד את עובי המדרכה לפני ואחרי הריצוף, זאת כדי לוודא כי עובי המדרכה אכן עונה על דרישות הפרויקט. כיום מדידת עובי המדרכה דורשת קידוח בורות דגימה במדרכות במרווחים שווים, אותם יש לכסות לאחר מכן. שיטת עבודה זו דורשת כוח-אדם רב, ולא חושפת את כל הבעיות במדרכות. הכותבים מציעים שימוש בסורקי לייזר דו-ממדיים שיסרקו את בסיס המדרכה בזמן-אמת, לפני הריצוף ולאחריו. בדרך זו, מתקבלת מפת גבהים של המדרכה, כולל כיסוי מלא של השתיית ומבנה המדרכה הסופית. בדיקת השיטה נעשתה במסגרת ניסויים במעבדה (רי איור 3-12). הכותבים מציינים כי הרעשים סוננו לפני יצירת המודל, אך אינם מציינים באילו שיטות השתמשו. כמו-כן, נקודות שאינן שייכות למדרכה סוננו תוך השוואת גובהן לערך סף שנקבע מראש.



איור 3-12 חתך של הקרונית במעבדה עם סורקי הלייזר (Walters ו-Jaselskis 2005)

לשם יצירת המודל התלת-ממדי נבנתה טריאנגולציה מענני הנקודות, כאשר הסריקות התבצעו לפני ואחרי הריצוף כך שלאחר השילוב ניתן לחשב את עובי המדרכה ואת נפח יציקת הבטון. הכותבים אומרים כי המערכת מוזילה את עלות בדיקות המדרכה, שכן מדידות העומק של פרופיל הבטון המתקבלות בזמן-אמת מייטרות את הצורך בחפירת הבורות ובבדיקת גובה המדרכה.

בשונה מהמערכת המתוארת לעיל, Walters ואחרים (2008) מציינים אלגוריתם לחישוב עובי מדרכת בטון בזמן-אמת בעזרת סורקי לייזר קרקעיים הממוקמים בעמדה קבועה. כיוון שסריקת פני המדרכה לפני ואחרי הריצוף מאפשרת את קביעת עובייה בכל נקודה, ניתן לחשב את השתנות

עובייה ולאחר מקומות בהם העובי נמוך מהתקן בזמן-אמת (Walters and Jaselskis, 2005). לשם יישום השיטה המוצעת בוצעו סריקות בעזרת סורק לייזר קרקעי מסחרי, בשלושה פרויקטים שונים. בכל אחד מהפרויקטים הוצב הסורק בצד הדרך, ובוצעו שלוש סריקות: (1) סריקת בסיס המדרכה (הסוללה), לפני מפזרת הבטון, (2) סריקה לאחר מעבר מכונת הסלילה (paver), (3) סריקה לאחר מעבר המכבש. לשם סינון רעשי הרקע והרעשים שנגרמו ממעבר פועלים מול הסורק, טוענים הכותבים כי נעשה שימוש בהקבצה, אם כי בפועל נראה כי נעשה שימוש בערכי הטווח בין הנקודות המדודות על המדרכה לקביעת ערך הסף. מכיוון שניתן לזהות בקלות את משטח הבטון של המדרכה, הנקודות מוינו לשתי קבוצות: פני המדרכה ובסיס המדרכה. לאחר הסיווג נעשתה אינטרפולציית Kriging לשני המשטחים. עובי המדרכה חושב, לאחר האינטרפולציה, כהפרש הגבהים בין פני המדרכה ובסיסה, על ידי דגימה אקראית. לצורך ניתוח סטטיסטי של הנתונים מוצגים במאמר ממוצע העוביים בכל פרויקט, הטווח (ההפרש בין הערך הגבוה ביותר והנמוך ביותר), ההפרש בין ערכי הרבעון העליון לתחתון, וסטיית התקן. במאמר מפורטת גם שיטה לקביעת המרווחים בין הדגימות וגודלן.

הכותבים מצאו כי השונות בעובי המדרכה במקומות בהם נעשה שימוש באגרטים גדולים ליצירת בסיס המדרכה היה גדול יותר מאחרים, ולכן הם מציעים לחפש מודל מתאים יותר לאינטרפולציית בסיס המדרכה, שלא יתבסס על ממוצע הגבהים. כמו-כן, הכותבים לא מצאו דרך בעזרתה ניתן לתכנן את דגימת המדרכה, קרי, מספר הדגימות והמרווחים ביניהן, מכיוון שגם במספר המקסימאלי של הדגימות, השונות הייתה גדולה מאוד. בנוסף, חסרה מערכת המשלבת בין ענני נקודות משני הסורקים ומערכת לבקרת קואורדינאטות, לשם מדידת גבהים מדויקת יותר. מצד שני, אומרים הכותבים, סריקות לייזר מאפשרות דגימות וירטואליות של המדרכה, דבר שיחסוך עלויות רבות.

3.2.5 שימוש בנתוני לייזר לצורך עבודות חפירה

Cheok ואחרים (2000) עושים שימוש בסורקי לייזר קרקעיים לצורך איסוף ועדכון מידע בנוגע לנעשה באתרי בנייה. הכותבים משתמשים בסורק לייזר למדידה אוטומטית של מילוי וחפירה, ומציגים שתי שיטות למדידה זו:

- האחת יוצרת רשת דו-ממדית סדורה מתוך ענן הנקודות, כאשר גובה הנקודות נקבע על סמך ממוצע משוקלל של גובה נקודות הסריקה ברדיוס המוגדר מראש על-ידי המשתמש. חישוב הנפח מתבצע על ידי סכימת הגבהים מעל הרשת והכפלתם בשטח.
- השנייה מתבססת על יצירת טריאנגולציות דלאוני, בה מוטלות הנקודות על מישור והנפח מחושב כסכום נפחי הפריזמואידות.

לצורך סימולציה של שינוי בפני השטח, נסרקה ערימת חול לפני ואחרי הוצאה של חול ממנה. הנפח שהוצא חושב הן בעזרת דליים והן בעזרת שתי השיטות, והשווה. נפח השינוי שהתקבל היה זהה בין שתי השיטות ושונה במעט מהמחושב בפועל. לדעת הכותבים השוני נבע מאופן מדידת הנפח בפועל. הכותבים מדגישים כי ניתן להשתמש בסורקי לייזר קרקעיים לצורך עדכון בזמן-

אמת של התקדמות הבנייה, שכן החישוב בעזרת שתי השיטות נעשה תוך מספר שניות, והנתונים הועברו מהסורק למחשבים היישר מהשטח בשימוש ברשת אלחוטית.

Teng ו-Du (2007) בודקים את יעילות השימוש בסורקי לייזר קרקעיים ו-GPS לאיסוף מידע בנוגע למפולות אדמה ולחישוב נפח עבודות עפר. קיימת בעיה בחישוב מהיר ומדויק של נפח עבודות העפר הדרוש באזורים מסוכנים שהיו נתונים למפולות אדמה, בייחוד בשל חשיבות הדיוק בקביעת המיקום והנפח אל מול הקושי להיכנס לאותם אתרים. הכותבים מציעים שילוב בין סורק לייזר קרקעי ומכשירי GPS, כך שנקודות בקרה שנמדדו בעזרת GPS מפוזרות באזור מפולת האדמה ונסרקות בעזרת סורק הלייזר. מתוך נתוני הסריקה יוצרים קווי גובה תלת-ממדיים, חדשים. בעזרת מדידות ה-GPS, שולבו קווי הגובה החדשים במפת קווי הגובה הידועים של האזור, ונפח המפולת הדרוש חושב לפי:

$$V = \int_a^b A dh = \left(\frac{h}{3}\right)(A_0 + 4A_1 + 2A_2 + 4A_3 + \dots + 4A_{n-1} + A_n)$$

כאשר V – נפח המפולת; h – ההבדל בין קווי הגובה ו- $A_0, A_1, A_2, A_3, \dots$ שטח המקטעים האופקיים בין שני קווי גובה.

האי-דיוקים הרבים בחישוב נפח המפולת בניסוי המוצג נבעו בשל ציפוף קווי הגובה הנתונים (שמרווחיהם היו 50 מ') ל-10 מ', בעזרת אינטרפולציה. למרות זאת הכותבים אומרים כי בהינתן מפת קווי גובה בצפיפות גבוהה יותר, ניתן להעריך את נפח מפולת האדמה.

3.2.6 ניטור תזוזות קרקע בעת עבודות חפירה

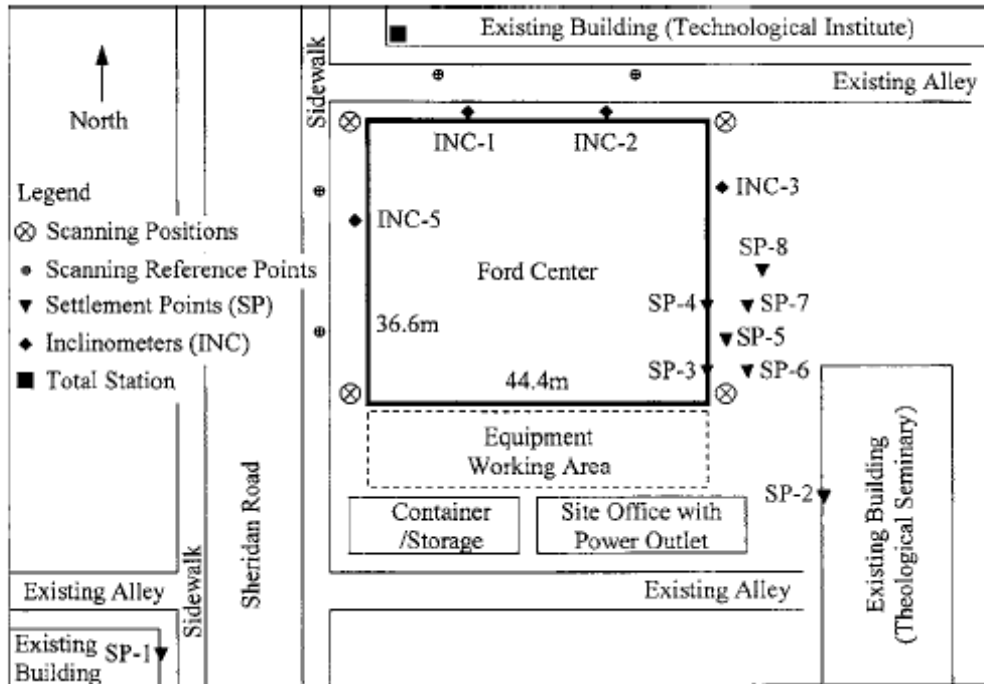
Trupp ואחרים (2004) מתארים (איכותית) את השימוש בטכניקות של סריקות לייזר תלת-ממדיות ופוטוגרמטריה קרקעית, למעקב אחר תהליך חפירה בסביבה עירונית באופן מדויק. כתוצאה מעבודות חפירה, הנעשות באזורים עירוניים, מתרחשות תזוזות קרקע שעלולות להזיק לבניינים מסביב, ולכן יש לנטר את גודלן. עד כתיבת המאמר, תזוזות הקרקע בחפירות חדשות נבדקו באמצעות שיטות סמי-אמפיריות המתבססות על ניסיונות עבר ועל תוצאות נומריות של מודלים. כמו-כן, מוקלט מידע בעזרת מערכות ניטור המקליטות את תזוזות הקרקע באזור החפירה ובבניינים השכנים. עם זאת, קיים עדיין צורך במידע מפורט ומדויק של הנעשה בשטח. לשם קבלת מידע זה, מציעים הכותבים שימוש בפוטוגרמטריה קרקעית או בסריקות לייזר. הכותבים מדגימים את הטכנולוגיות על שני סטים שונים של נתונים, האחד למיפוי הפוטוגרמטרי, והשני בעבור סריקת הלייזר.

במאמר מתוארות האפשרויות הגלומות בפוטוגרמטריה באתרי בנייה, כגון בניית מודל תלת-ממדי מדויק של האתר בזמן-אמת, וחישובי נפח ופרופילים של אתרי החפירה. כמו-כן, מפרטים הכותבים את עקרונות טכנולוגיית הלייזר ויתרונותיה: סורקי הלייזר מאפשרים איסוף מדויק של מידע as-built מאתר הבנייה, בעזרתו ניתן גם לחשב נפחים. על-מנת לבדוק האם השיטה אפשרית, בוצעו סריקות במהלך חפירה. לאחר מכן, נעשתה רגיסטרציה של הסריקות בעזרת תוכנה

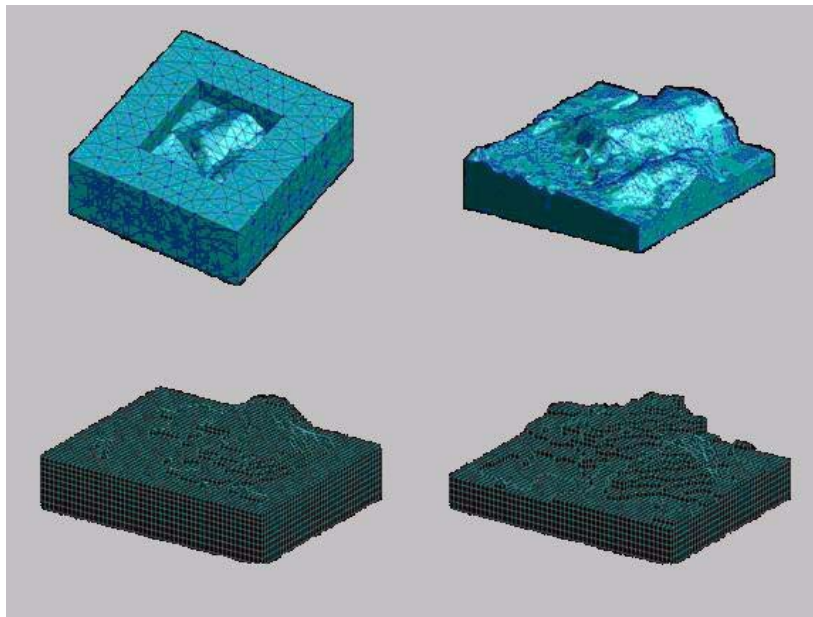
מסחרית, ונמחקו ידנית בניינים וציוד. נפח החפירה חושב בעזרת אינטגרציה של המרחקים ממישור הקרקע, שהתקבל מהסריקה הראשונית, אל פני השטח בסריקות האחרות.

כהמשך למחקר זה, Hashash ואחרים (2005) ו-Su ואחרים (2005, 2006) מתארים עבודת שדה בה נעשה שימוש בסורקי לייזר, לצורך איסוף נתוני as-built באתר חפירה. מידע as-built מדויק נדרש במהלך עבודות החפירה לשם ניטור ההשפעה של תזוזות הקרקע על הבניינים באזור (ר' גם Trupp ואחרים 2004 בהקשר זה). איסוף הנתונים נפרס על פני כארבעה חודשים, בהם האתר נסרק מדי שבוע (סך-הכל, 13 מקבצי סריקות), כאשר הסורק הועמד באותן העמדות בכל פעם (ר' איור 3-13). עמדות הסורק נבחרו מחוץ לתחומי החפירה כך שנתקבלו קווי ראייה נקיים וכמה שפחות הסתרות, במקומות בטוחים שאינם מפריעים לעבודה השוטפת. כדי להקל את עבודת עיגון הסריקות בסוף תהליך האיסוף, נסרקו גם נקודות ייחוס.

הסריקות מעוגנות בשלב הראשון, ולאחריו מבוצע סינון ידני של הבניינים הסמוכים וכלי העבודה. כדי שניתן יהיה לשלב הן את כל הסריקות שנעשו יחדיו והן נתונים אחרים שנמדדו בעזרת שיטות אחרות באתר, הותמרו הקואורדינאטות של ענני הנקודות למערכת קואורדינאטות אחת אחידה. הכותבים השתמשו בתוכנה מסחרית כדי לחשב את נפח החפירה, בעזרת השיטה שהוצגה על ידי Trupp ואחרים (2004). בנוסף, נתוני הלייזר שנאספו אפשרו ניתוח גיאוטכני, תוך התאמת המידע שהתקבל על גיאומטריית החפירה עם המידע שהתקבל מהמכשירים המודדים את דפורמציות הקרקע. לבסוף, נבנתה רשת טריאנגולציה שתעזור בעתיד בפיתוח מודל אלמנטים סופיים (FEM) בעבור מידול נומרי של תהליך החפירה והשפעותיו על דפורמציות הקרקע, כמתואר במאמרם של Filho ואחרים (2005), שמראים את האפשרות לעבד נתוני לייזר שנאספו באתרי חפירה לצורך ניתוחים קונסטרוקטיביים וגיאוטכניים. כאמור (Hashash et al. 2005; Trupp et al. 2004), ישנו צורך במערכת ניטור במהלך החפירות לתיעוד תזוזות הקרקע, למען בקרת השפעתן על תשתיות הבניינים הסובבים את אתר החפירה. בדרך-כלל נעשה שימוש בחיישנים המודדים את התזוזות הציריות בקרקע ואת הדפורמציות של הבניינים, אך מידע זה לוקה בחסר, ואינו מפורט דיו. הכותבים משלבים בין תמונות הלייזר הסטטיות, שהתקבלו אצל Hashash ואחרים (2005) לבין נתוני החיישנים לצורך קבלת מידע דינמי בנוגע לנעשה בשטח. בעזרת שילוב זה, ניתן היה להתאים בין רצף פעולות שנעשה בשטח לבין התזוזות שנתקבלו במערכת הניטור, ועל-ידי-כך למצוא את השפעת רצף הפעולות לדפורמציות באתר. בנוסף, מתוך המודל שהתקבל על ידי Hashash ואחרים (2005) נבנה מודל אלמנטים סופיים (ר' איור 3-14). הכותבים מציינים כי נכון לזמן כתיבת המאמר, עדיין נחקרת האפשרות לשילוב מודלים של שלבים שונים בחפירה במודלי האלמנטים הסופיים כך שניתן יהיה לראות את השפעת מצב החפירה על המודל המתקבל, וכן שילובם במערכות ניטור התזוזות.



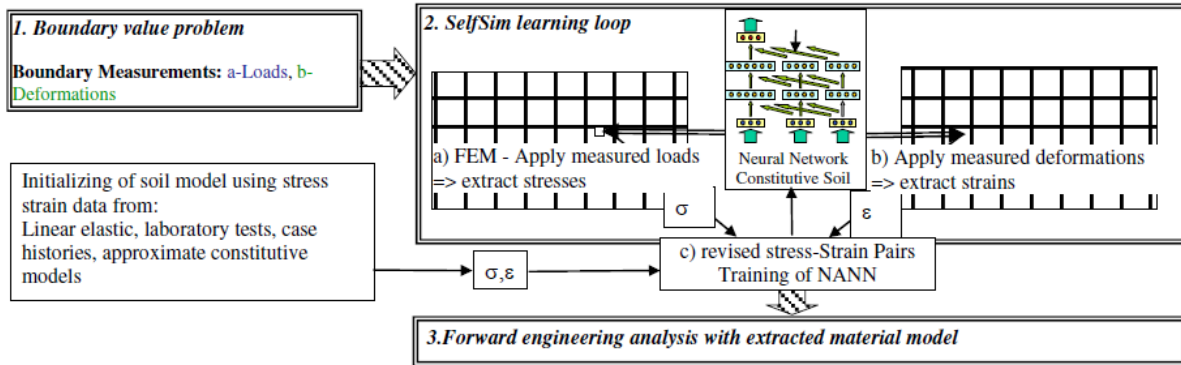
איור 3-13 תוכנית המדידה והסריקה של אתר החפירה (Su ואחרים 2006)



איור 3-14 מודלי שטח מותמרים ומועברים למודלי אלמנטים סופיים (Filio ואחרים 2005)

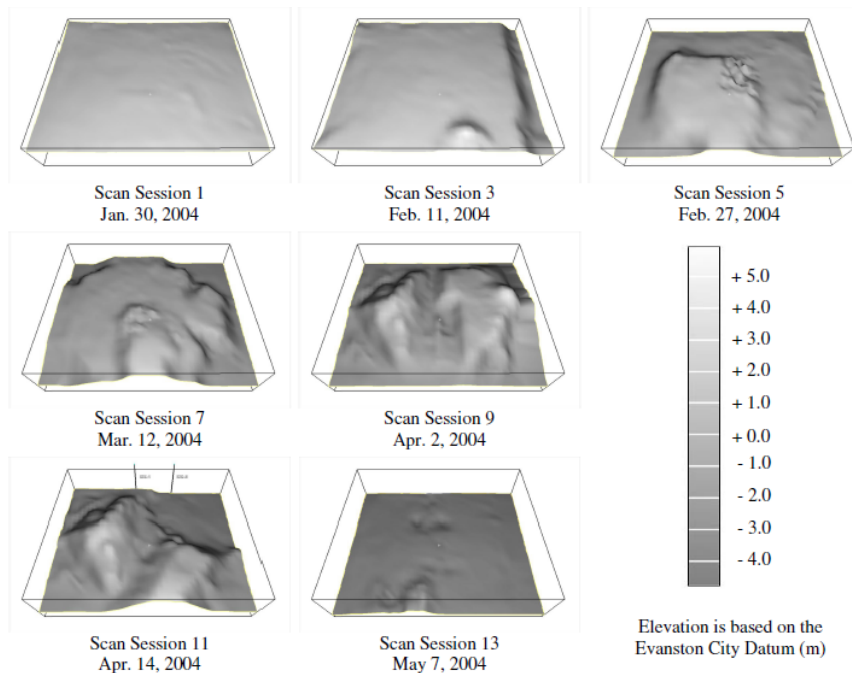
Hashash ואחרים (2006a) מציגים מערכת של מודלים נומריים אוטונומיים לחיזוי תזוזות קרקע, הלומדים מהתצפיות בשטח, תוך התחשבות בסוג הקרקע (איור 3-15). כמו כן, מציניים הכותבים שימוש בסריקות לייזר לתיעוד מדויק של מהלך הבנייה ושילוב מידע הטרוגני במערכות מידע גיאוגרפיות, כטכנולוגיות חדשות לחיזוי וניטור תזוזות קרקע בחפירות בסביבה עירונית. המערכת המוצגת, SelfSim, לומדת את תגובת הקרקע לחפירות בעזרת רשתות נוירונים. המערכת

משתמשת או בנתוני מדידה של תזוזות ועומסים שנמדדו בטווח מסוים, או בנתוני מעבדה ידועים. בעזרת מודלי אלמנטים סופיים מושוות התגובות החזיויות והמדודות ועל-ידי כך נמצאים נתוני הקרקע באופן איטרטיבי. לשם בדיקת המערכת נעשה שימוש בנתונים שנמדדו באתר חפירות. מבדיקת המערכת בעזרת נתונים שנאספו באתרי חפירה נמצא כי למרות שהמערכת למדה, והדפורמציות שחושבו היו זהות לאלו שנתקבלו בשטח, לא נתקבל מידע בנוגע לתגובת הביניים של הקרקע – בין התזוזה הקטנה ביותר לגדולה ביותר.



איור 3-15 מערכת ה-SelfSim: מתווה תהליך הלמידה העצמאית של הסימולציה (Hashash ואחרים 2006a)

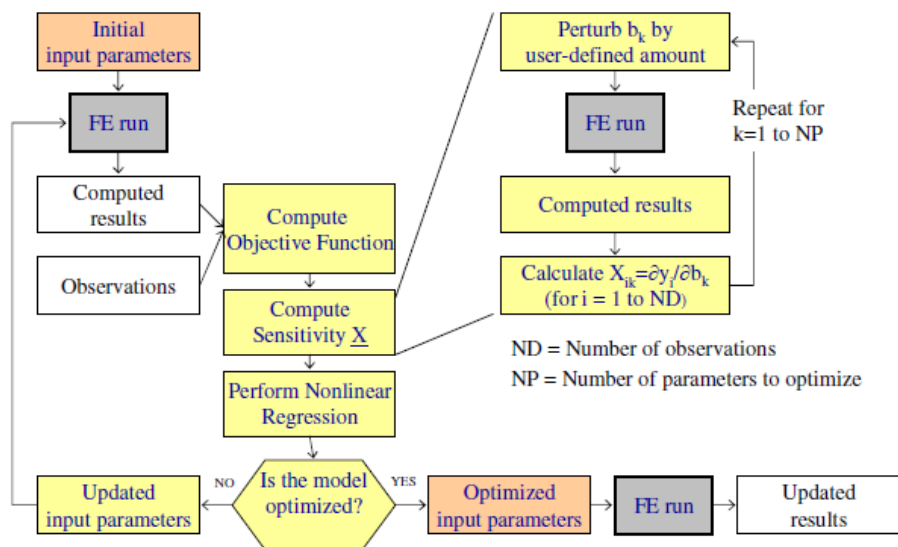
Hashash ואחרים (2006b) מדגימים את תוצאות המחקר שהחל ב-2004 (Su et al. 2006; Filho et al. 2005; Hashash et al. 2005). הכותבים טוענים כי ניתן לראות את הקורלציה בין הפעילות בשטח, שתועדה בעזרת סורקי לייזר (איור 3-16), לבין התזוזות הציריות בקרקע שנמדדו באינקלינומטר. מציאת קורלציה זו מסייעת למידול הדפורמציות בקרקע הנגרמות עקב חפירות עמוקות בסביבה עירונית, תוך העברת נתוני סריקות הלייזר למודלי אלמנטים סופיים (Filho et al. 2005).



איור 3-16 גיאומטריית פני השטח בתאריכי הסריקה השונים (Hashash ואחרים 2006b)

Hashash ו-Finno (2006) מתארים את האלגוריתם עליו מבוססת המערכת, SelfSim, שקוויה הכלליים הוצגו על ידי Hashash ואחרים (2006a). כמו כן, מוצגת מערכת מבוססת-GIS, בה משולב המידע שנקלט ממצלמות אינטרנט וסריקות לייזר וחיישנים שונים המודדים את תזוזות הקרקע. הכותבים מציגים את תהליך אופטימיזציית הפרמטרים (ר' איור 3-17) הנועד לכיול מערכת SelfSim, ומדגישים כי הוא מבוסס על טכניקת "ניתוח הפוך" (Inverse Analysis), שכן רק לאחר התחלת הפעילות באתר ניתן להשתמש בתגובות הקרקע לאתחול המערכת, ולהגדיל את יכולת החיזוי שלה בעבור שלבים מאוחרים יותר בחפירה. חיזוי תגובות הקרקע יכול להיעשות בעזרת טכניקות אופטימיזציה או סימולטורים כגון SelfSim.

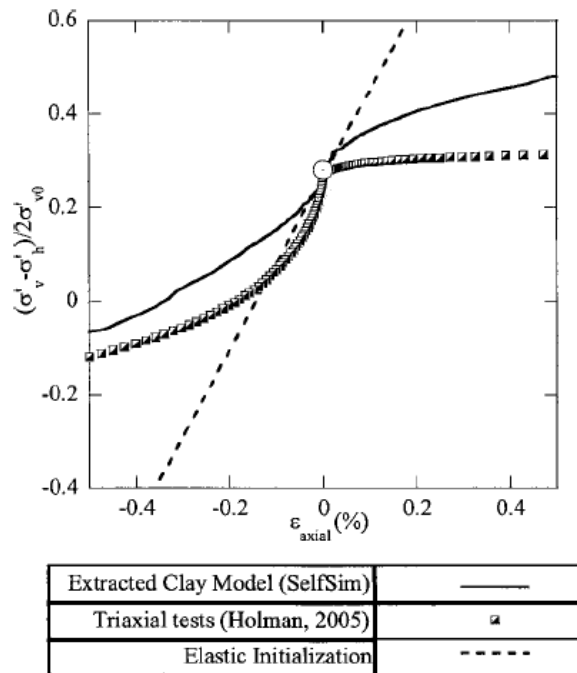
במערכת ה-GIS המוצגת משולבים הנתונים המתקבלים מכלל החיישנים באתר. במערכת זו, פני השטח של אתר החפירה מחולצים מתוך סריקות הלייזר, ומשולבים בתוכניות האתר. בעזרת שאילתות יכול המשתמש לקבל מידע טבלאי וגרפי של מדידות שנעשו באתר, תמונות, והערות בנוגע לתהליך הבנייה. הכותבים מציינים כי נעשה מחקר נוסף על מנת לשלב את שתי המערכות, SelfSim ומערכת ה-GIS, יחדיו, לצורך חישוב ועדכון תדיר של התחזיות בנוגע לדפורמציות הקרקע תוך שימוש במידע מהשטח ובמודלים נומריים.



איור 3-17 תהליך מציאת הפרמטרים לצורך כיול מערכת ה-SelfSim (Finno ו-Hashash 2006)

Hashash ו-Finno (2008) מתארים את המשך פיתוחם של הכלים שהוצגו במחקרים קודמים (Trupp et al. 2004; Filho et al. 2005; Finno and Hashash 2006; Hashash et al. 2006; Su et al. 2005; Su et al. 2006). לאור הניסיונות שנעשו, מצאו הכותבים כי שימוש בסורקי לייזר הוא הכרחי להבנה וחיזוי של תזוזות הקרקע והמבנים שמסביב לאתר החפירות, שכן ניתן להשתמש במודלי פני השטח הנרכשים לשיפור אמינותן של סימולציות נומריות. בנוסף, נתוני הלייזר מאפשרים ניהול בנייה טוב יותר, ופיתוח תוכניות as-built בדיוק גבוה מאוד. כמו כן, שילוב של נתוני הלייזר עם תמונות שנרכשות בעזרת מצלמות אינטרנט מאפשר לכמת את השינויים הנראים בתמונות. שינויים אלו ניתנים להערכה איכותית בלבד כאשר נעשה שילוב של התצלומים עם המידע הנרכש מכלים אוטומטיים הנשלטים מרחוק והמודדים תזוזות (כגון tiltmeter, המודד תזוזות אנכיות

ודפורמציות זוויתיות של המבנים שמסביב לאתר, ו-total station, המודד באופן אוטומטי מספר פריזמות על בניינים שמסביב לאתר החפירה). הכותבים מתארים בפרוטרוט את המערכת SelfSim שתוארה במאמרים הקודמים (Hashash et al. 2006; Finno and Hashash 2006), בדגש על האלגוריתם מבוסס הניתוח ההפוך שהוצג על ידי Finno ו-Hashash (2006). לטענת הכותבים, לטכניקת הניתוח ההפוך יתרון רב, שכן היא מאפשרת להשתמש בנתונים מסוגים שונים ועל-פיהם להעלות את אמינות המערכת ולהתעדכן תדיר. הכותבים כיילו את מודלי האלמנטים הסופיים בעזרת UCODE – שהופך את בעיית המידול ההפוך (inverse modeling) לבעיית פרמטר איטרטיבית, בסופה מתקבל גם דיוקו של הפרמטר (Finno and Hashash 2006). הכותבים מדגישים כי ההזזות המרביות שחושבו בסוף הבנייה היו שונות ב-15% מההזזות המדודות, דבר שמוכיח כי ביצוע כיוול חוזר בשלב מוקדם של הבנייה משפיע על התזוזות החזויות. תוצאות האלגוריתם מוכנסות למערכת ה-SelfSim, בה נעשה שימוש במערכת נירונים לחיזוי תגובות הקרקע. הכותבים מציגים השוואה שנעשתה בין חיזוי תגובות הקרקע שהתקבל בעזרת SelfSim לעומת תגובות הקרקע שנתקבלה במעבדה (איור 3-18).



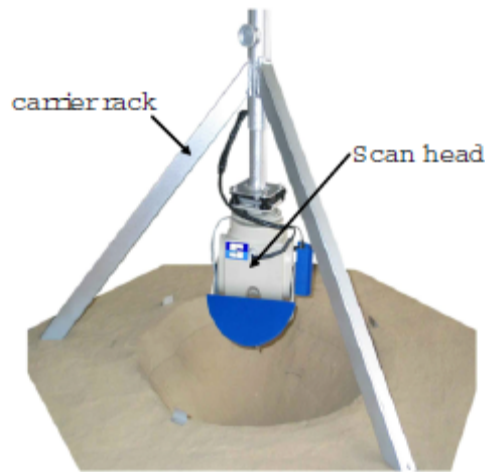
איור 3-18 השוואה בין מדידות שנעשו באוניברסיטת Northwestern על-ידי Holman והתוצאות החזויות שנמצאו בעזרת SelfSim (Finno ו-Hashash 2008)

3.2.7 התאמת סורקי לייזר ליישומים ייחודיים

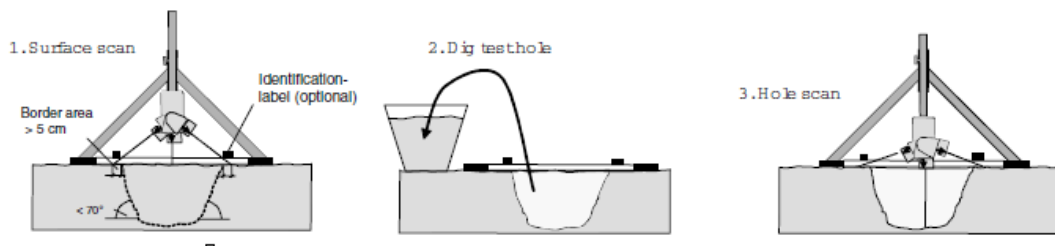
מלבד השימושים הרגילים בסורקי לייזר, ישנם מאמרים המתארים שינויים במבנה הסורק או באופי העבודה איתו לטובת אותו מחקר.

Kudla (2008) מציע שיטה למדידת נפח מדויקת של בור ניסוי בעל דפנות ופני שטח לא-רגולאריים, לשם מדידת צפיפות קרקע דחוסה בה נעשה שימוש בעבודות עפר. בכל השיטות הנהוגות למדידת

צפיפות קרקע, עד כתיבת המאמר, נפח הקרקע כמעט ואינו נמדד, דבר שגורם לשגיאות אקראיות רבות, במיוחד בקרקעות הגרוסות באופן גס. השיטה המוצעת מורכבת מארבעת השלבים הבאים (ר' איור 3-20): (1) מעל הנקודה בה מתוכנן בור הבדיקה מוצב סורק לייזר ופני השטח נסרקים (ר' איור 3-19); (2) בור הניסוי נחפר, ומסת הקרקע המוצאת, כמו גם תכולת המים בקרקע, נבדקות במעבדה; (3) סורק הלייזר מוצב בשנית מעל הבור, ונפח הבור מחושב בעזרת משטחי דפנות הבור, הנסרקים בצפיפות גבוהה (יש לציין כי חישוב זה נעשה בעזרת תוכנה מסחרית, אך אינו מפורט במאמר); (4) צפיפות הקרקע מחושבת לפי חלוקה של מסת הקרקע בנפח הבור. יתרון שיטה זו הוא ביכולת להציג באופן ויזואלי את דפנות הבור לאחר הוצאת הקרקע, כמו גם את השינוי בהן כתוצאה מהחפירה. כמו-כן, זוהי השיטה היחידה בעזרתה ניתן לראות את הבור בצורה תלת-ממדית, דבר שמאפשר מדידת קוטר וגובה של בור הניסוי.



איור 3-19 סורק הלייזר מוצב מעל הבור (2008 Kudla)



איור 3-20 שלושת השלבים הראשונים של התהליך המוצע (2008 Kudla)

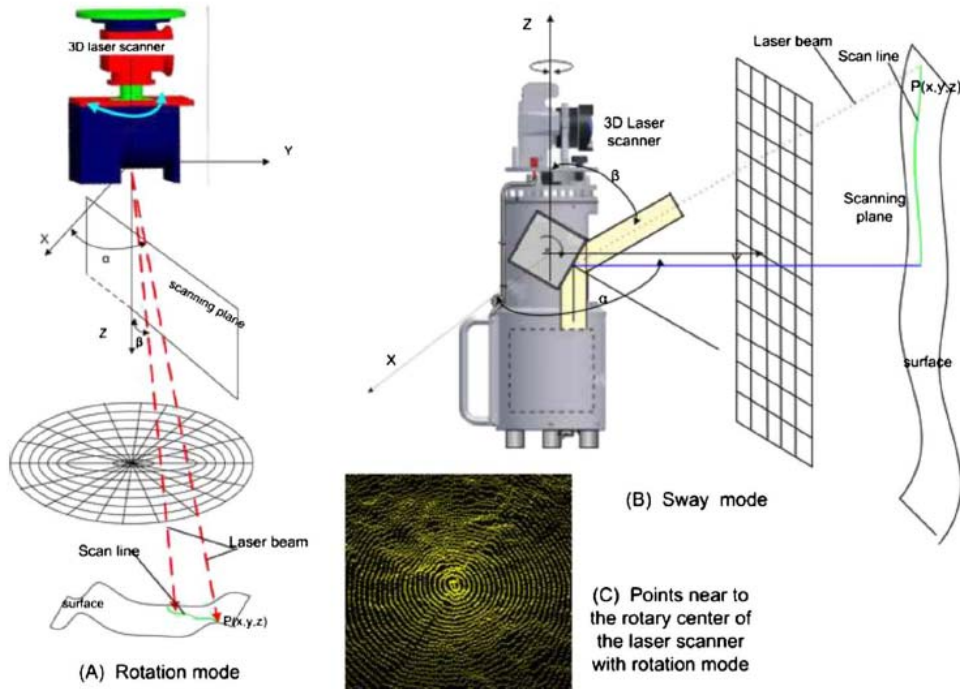
לצורך השוואה בין השיטה המוצעת ושאר השיטות הקיימות נבדקו חללים שמאפייניהם ידועים (מצב המשטח העליון, המבנה והחומר ממנו הם בנויים, וכמובן הנפח שלהם), ונעשו מדידות חוזרות של אותם החללים, באותם התנאים, למציאת סטיית התקן של המדידות בשיטות השונות. בהשוואה זו נמצא כי דיוק המדידות בשיטה המוצעת טוב יותר משאר השיטות הקיימות. בנוסף, מכיוון שבעזרת סורק הלייזר ניתן למדוד כל גודל בור שהוא, השיטה מתאימה גם למקומות בהם הקרקע היא סלעית או שהיא חצץ בעל קצוות חדים.

Li ואחרים (2010) משתמשים בסורקי לייזר למידול מרחבי של תא לחץ פניאומאטי (pneumatic caisson). חפירת תא לחץ פניאומאטי נעשית מרחוק, על-ידי מספר מחפרונים. על-מנת להפעיל את המחפרונים בבטחה מרחוק, כך שלא תהיינה התנגשויות באתר, הותקנו מספר מצלמות באזורים שונים באתר העבודה, שסיפקו תמונת מצב דו-ממדית. אי-לכך, עלה הצורך במידול האתר בצורה תלת-ממדית בזמן אמת. מכיוון שבחפירות תא לחץ ציוד החפירה נע הלוך וחזור על מסילות המחברות לתקרה, חייב סורק הלייזר להיות מוגן בגומחה בתקרה – דבר שמגביל את שדה הראייה שלו ואת מרחב תזוזותיו. הכותבים מציעים כפתרון מערכת לייזר חדשה המותאמת במיוחד למטרה זו (ר' איור 3-21).



איור 3-21 סורק הלייזר התלת-ממדי המותקן בתא הלחץ הפניאומאטי (Li ואחרים 2010)

בשונה מסריקת ה-"sway" הנהוגה כיום בסורקים מסחריים, בה נסרקים קווים אנכיים וכיוון הסריקה מסובב את הלייזר ב- 360° , מוצעת סריקה בשיטת ה-"rotation" בה מתקבלים קווי סריקה קונצנטריים, בצורת מניפה. בשיטה זו הלייזר מסתובב סביב ציר z, עם זווית סריקה α בין 0° ל- 180° . (ר' איור 3-22).



איור 3-22 דוגמאות לשני הסוגים של סורקי הלייזר: Rotation mode ו-Sway mode (Li ואחרים 2010)

לאחר הסריקה מבוצע תהליך עיבוד נתוני הלייזר, שמתחיל ברגיסטרציה המבוססת על טרנספורמציה Hough, ומסתיים בבניית משטחים תלת-ממדיים. שיטת הרגיסטרציה אותה מציעים הכותבים מורכבת ממספר שלבים: חילוץ והתאמת קטעי קווים ישרים בין סטים של נקודות, תוך שימוש בשיטת הריבועים הפחותים; לאחר-מכן חילוץ מישורים בעזרת Modified Hough Transform מתוך המקטעים שנמצאו בשלב הקודם; ולבסוף פתירת המיקום היחסי בעזרת זוגות של מישורים מתאימים.

הכותבים מפרטים את השיטה לבניית המשטחים התלת-ממדיים, המורכבת גם היא משלושה שלבים: (1) סגמנטציה ענן הנקודות לאזורים שונים תוך שימוש בעקומים; (2) בניית רשת טריאנגולציה; ו-(3) חישוב הנורמאלים של נקודות הצמתים לוויזואליזציה נוחה. השיטה המוצעת יושמה באתר בנייה של תא-לחץ פניאומטי לאורך כל תקופת בנייתו. מתוך ניסוי זה מצאו הכותבים כי לחץ האוויר בתא ישנה השפעה על מהירות ורזולוציית הסורק – כאשר הלחץ יורד מהירות הסריקה יורדת גם היא. למרות זאת, אומרים הכותבים, תהליך עיבוד נתוני הלייזר המוצע סיפק תוצאות טובות הן מבחינת דיוק והן מבחינת מהירות רכישת המידע.

Kwak ואחרים (2007) מציינים שילוב של מרכיבים בעבור בדיקה כמותית של קווי צינורות ביוב, הכוללים מערכת ניידת חסונה (Responder) (ר' איור 3-23), מערכת חיישנים ובה סורק לייזר תלת-ממדי, ושיטות לעיבוד נתונים המבוססות על ראייה ממוחשבת. בדיקה זו חשובה לתחזוקת קווי הביוב, ובעזרתה ניתן לבנות מודלים תלת-ממדיים שיוכלו לתאר בדיוק את מיקום הצינור, מצב שלמותו, ויעילותו.



איור 3-23 מערכת ניידת Responder והפעלתה (Kwak ואחרים 2007)

הכותבים מציגים את מערכת ה-Responder ומדגישים כי ניתן להרכיב עליה כל סוג חיישנים שהוא, החל ממצלמות, סונאר, Multi-gas logger, סורק לייזר, ועוד. שלוש אפשרויות של שימוש בסורק הלייזר בצינורות הביוב נבחנו כחלק ממאמר זה: (1) הערכת ההשפעות של הנחת קו נוסף על קיבולת מערכת התעלות; (2) שימוש בסורק לייזר לצורך הערכת דיוק במדידת קורוזיה; ו-(3) שימוש בסורק הלייזר לצורך מיקום שני צינורות מקבילים.

קיבולת מערכת תעלות הביוב תלויה, לפי הכותבים, בשטח החתך של הצינור ובהיקף הרטיבות. לשם חישוב מדויק של שטח החתך נסרק הצינור, ומתוך כל סריקה חושב החתך (בעזרת Convex-Hull), לאחר מציאת ציר הצינור. הכותבים מציינים כי בשימוש במודל תלת-ממדי נעדרת הנחת היסוד המנחה ניתוח של דו-ממד, בנוגע לכך שחתך הצינור ניצב לציר הצינור – ולכן התוצאות המתקבלות בנוגע לשטח ולהיקף הצינור מדויקות יותר (סטיית תקן מרבית בערך של 0.0003 מ"ר). הכותבים טוענים כי הערכת הקורוזיה בצינורות בעזרת תצלומים, כמקובל, היא סובייקטיבית וויזואלית בלבד. לשם בדיקת השימוש בסורק הלייזר בסיטואציה זו, חושבו, לאחר הסריקות, ציר הצינור, תיקונים למיקום החיישנים, ומציאת הקואורדינטות של מסגרות הצינור. לאחר יישור הסריקות, הקורוזיה נצבעה לפי הסטיות של גבולות החתך מהמרחק הצפוי מהציר. בצורה זו ניתן היה גם לכמת את הקורוזיה, בעזרת סכימת החתכים. לצורך מציאת מיקומם של שני הצינורות המקבילים, אשר המידע הקודם בנוגע למיקומם מוגבל ביותר, היה צורך ברגיסטרציה הסריקות השונות. לשם כך נעשה שילוב בין שתי שיטות רגיסטרציה: האחת, dead-reckoning-technique המתבססת על שימוש באוריינטציה ומד-מרחק; והשנייה, מבוססת-Iterative Closest Point (ICP). הכותבים מציינים כי בכמה אזורים, לאורך הצינורות, בוצעו חפירות שאימתו את המידע שהתקבל בעזרת סורקי הלייזר בנוגע למיקום הצינורות.

Olsen ואחרים (2009) מציעים שיטה הנעזרת ב-RTK GPS לעיגון סריקות לייזר קרקעיות לצורך מיפוי צוקים שמשתנים מדי עונה, עקב סחיפה (ר' איור 3-24). בעזרת השיטה, העיבוד הידני והצורך בידע קודם מצומצמים באופן משמעותי. הכותבים מתארים מספר פרמטרים לתהליך המדידה, ואת הדרכים לקביעתם, הנדרשים למדידת צוקים באמצעות סורקי לייזר קרקעיים,

והם: המרווח בין נקודות הסריקה, המרחק האופקי בין נקודת הסריקה והצוק, וכן רזולוציית הסריקה ביחס לרזולוציית הסריקה המקסימאלית האפשרית בסורק, כאשר יחס הרזולוציות משפיע על יכולת ההפרדה בין הנקודות ועל צפיפותן.

לשם מציאת פרמטרי המדידה האופטימאליים נעשו מדידות כיול בחלק קטן מהאזור הממופה, תוך שימוש במשפט פיתגורס למציאת המרווח המקסימאלי בין נקודות הסריקה:

$$s_{\max} = \sqrt{r_{\max}^2 - d^2 - h^2}$$

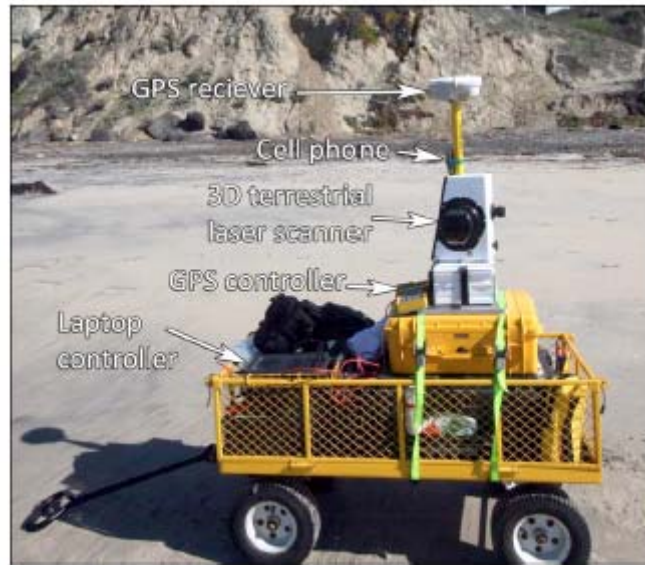
כאשר s_{\max} – המרווח המקסימאלי בין נקודות סריקה; r_{\max} – הטווח המקסימאלי של הסורק; d – מרחק הסורק מהצוק; h – גובה ממוצע של הצוק.

חישוב הפרדת הנקודות (point separation) על המטרה נעשה בעזרת הנוסחה:

$$\rho = d \cdot \tan \theta$$

כאשר ρ – יכולת הפרדת הנקודות על המטרה; d – מרחק מהמטרה; θ – הפרדה זוויתית (angular separation), וכן בעזרת ניסויי כיול באזור קטן, בהם הפרמטרים האחרים נמצאו בעזרת איטרציות. הפרמטרים האופטימאליים נבחרו כאשר התקבלה השגיאה הריבועית המינימאלית ביישור שתי סריקות שכנות. הכותבים מדגישים כי מכיוון שהפרמטרים האופטימאליים תלויים הן בסוג הסורק והן במורפולוגיית הצוקים, יש צורך לבצע מדידות כיול באזור קטן לפני המיפוי של שטחים גדולים.

עיגון הסריקות לרשת העולמית הורכב ממספר שלבים: (1) סריקה תוך שמירה על פרמטרים האופטימאליים שנמצאו בעזרת מדידות הכיול; (2) שימוש ברשת בקרה וירטואלית (VRS), או הקמת תחנת בסיס GPS כנקודת ייחוס למדידות ה-RTK GPS; (3) שימוש בנקודות קבועות עליהן מוצבים מקלטי RTK GPS לצורך כיול; (4) סריקת נקודות ה-RTK GPS לצורך הזנת הסורק למיקומו בקואורדינטות עולם, כאשר הסורק עצמו מפולס (כדי שלא יהיו סיבובים סביב הצירים); (5) שימוש בתוכנות ליישור הסריקות, שכן הסיבוב סביב ציר Z אינו נפתר לחלוטין בשדה; ו- (6) שימוש בשיטות שונות לבקרת איכות לשם אימות היישור של ענני הנקודות (מציאת המרחק הקטן ביותר בין נקודות בסריקה אחת והמישור הנבנה בעזרת שלוש הנקודות השכנות בסריקה השנייה, הסתכלות על חתך דו-ממדי של הצוק בשתי סריקות בו-זמנית, וכדומה).



איור 3-24 ציוד השדה לסריקות הצוקים: סורק לייזר קרקעי ומקלט GPS (Olsen ואחרים 2009)

Thayer ו-Hallmark (2009) מתארים מכשיר מבוסס לייזר למדידת אובאליות וסטיות בצינור. על-פי התקנות, הסטיות בקוטר הצינור לאחר ההתקנה צריכות להיות קטנות מ-5% מקוטר הצינור הנומינלי. עד כתיבת המאמר, חישוב הסטייה באובאליות של הצינור, לאחר הנחתו, התבצע על ידי הנחת ציר משונן, המתאים לקוטרו. הבעיה בהנחת ציר זה היא שבעבור סוגי צינורות שונים יש צורך לבנות את הציר מחדש, בהתאם לקוטר הצינור. כמו-כן, לא ניתן לבצע מדידות מדויקות של מצבו הגיאומטרי של הצינור בכללותו. לכן עלה הרעיון לעשות שימוש בסורק לייזר קרקעי ועל-ידי יצירת חתכים מדויקים, כפי שתיארו Olsen ואחרים (2009), למצוא את הסטייה מהקוטר הדרוש.

לשם כך, הורכב סורק לייזר על מגלשה (ר' איור 3-25), כך שיתאים לסוגים רבים של צינורות. בצורה כזו מתקבל מידע גיאומטרי מדויק לכל אורך הצינור, כאשר כל פגם בהתקנה מתועד וידוע. בנוסף, מתקבל מידע as-built על כל קו הצינור, דבר שמקל על ניתוח מחזור-החיים של הצינור. חילוץ חתכים מדויקים, ללא קשר לזווית הסטייה של הסורק, מאפשר מדידה של הסטייה מהקוטר הדרוש בכל מקום בצינור, במעבר אחד ויחיד של הסורק, דבר שהוא בלתי אפשרי בשימוש בציר פיסי.

על-מנת לבדוק את השיטה, נסרקו שלושה קווי מים המורכבים משלושה קטרים שונים של צינורות. במאמר לא מפורטות השיטות בהן עובדו נתוני הלייזר, אלא רק מצוין כי השימוש בסורק הלייזר המוצע היה יעיל ונוח למציאת סטיות מהנדרש בצינורות.



איור 3-25 סורק הלייזר על המגלשה, מותאם למעבר בצינורות שונים (Hallmark ו-Thayer 2009)

3.3 חיישנים אחרים באתרי בנייה

3.3.1 מד טווח

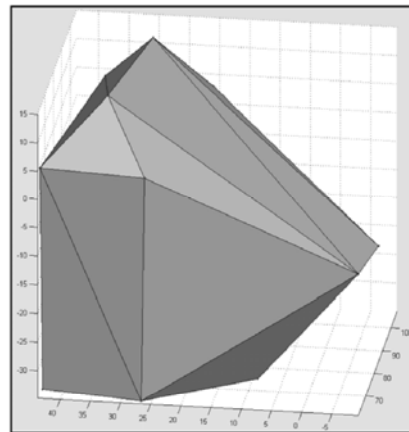
Kwon ואחרים (2004) מציעים שיטה להתאמת מידע המתקבל מענן נקודות דליל לפרמיטיביים לצורך מידול תלת-ממדי. ענן הנקודות הדליל נרכש באמצעות מד טווח (laser rangefinder) רכוב על מתקן הניתן להטיה (pan-and-tilt). השימוש במכשיר זה נובע מכך שניתן להשיג בעזרתו תוצאות מהירות בדיוק סביר בעבור מידול של מכשולים בשטח, אולם מידול של אובייקטים טיפוסיים לעבודת עגורן באתר (כגון וו ההרמה הנקשר לטפסה) מחייב דיוק ופרוט טוב יותר ולכן השיטה המוצעת במאמר אינה מתאימה לצרכי המחקר הנוכחי. כמו כן, הסריקה בשיטה המוצעת אינה אוטומטית ומחייבת התערבות ידנית לדגימת פרטים הנמצאים בשטח באמצעות קרן הלייזר באופן נוח לעיבוד הנתונים. עם קבלת ענן הנקודות הדליל הוצע אלגוריתם למציאה והתאמה של פרמיטיביים (כגון תיבות וגלילים) לאובייקטים הנמצאים בשטח. בשיטה זו אין התייחסות למיזוג פרמיטיביים השייכים לאותו אובייקט.

Kim ואחרים (2005) מציעים גישה לקבלת מידע מהיר מנתוני הלייזר על-ידי שימוש בענני נקודות דלילים (sparse point cloud) המתארים את אתר הבנייה בזמן אמת ובצורה יעילה. מכיוון שסביבת האתר משתנה תכופות, נדרשת שיטה למידול כמעט בזמן-אמת שיכולה לחלץ את האינפורמציה הדרושה על-מנת להימנע ממכשולים באתר. הכותבים מציעים שימוש בענני נקודות דלילים שיציגו את אתר הבנייה בצורה מפושטת, אומנם, אך בו-במקום, תוך שימוש ב-laser rangefinder שמורכב על מתקן הניתן להטיה, ומידול האובייקטים המורכבים מהנקודות המדודות בעזרת convex hull לקבלת תמונה כללית של המכשולים באתר. רמת הדיוק של המודל תלויה במספר ה-convex hulls שנבחר (ר' איור 3-26). למרות שהשיטה הוכיחה עצמה כיעילה במידול המהיר של

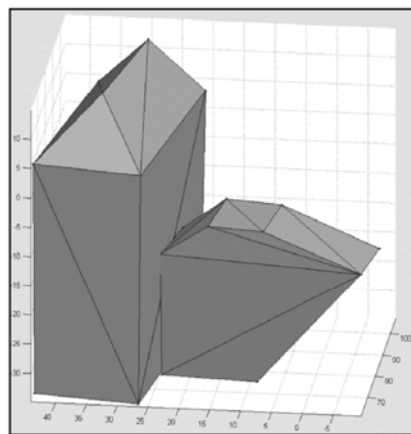
אתרי הבנייה, לא ניתן לייצג בעזרתה עצמים הזזים באתר, כגון אנשים או מכונות, וכן הייצוג הוויזואלי מפושט מדי ומוגבל.



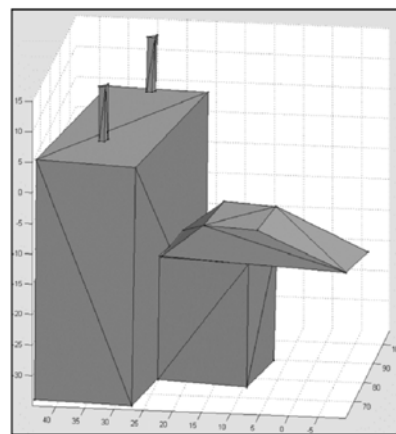
(a)



(b)



(c)

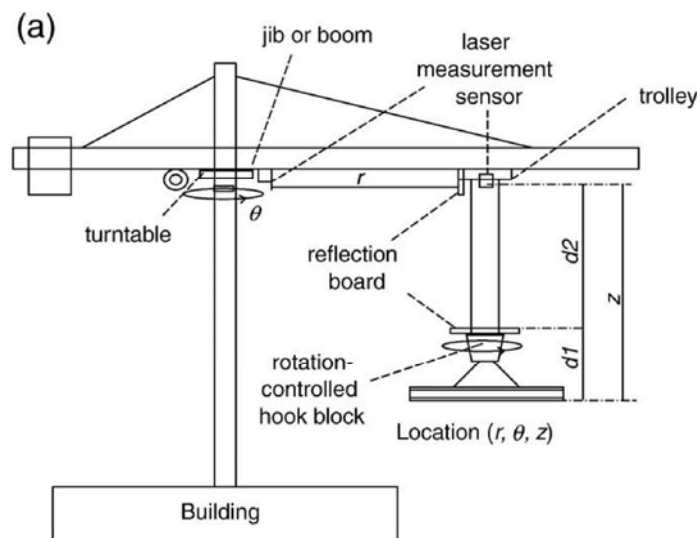


(d)

איור 3-26 הבדלי דיוק במודל כתלות במספרי ה-convex hull שנבחרו. (a) האובייקט שנסקר; (b) המודל המיוצר בעזרת convex hull אחד; (c) מודל המיוצר בעזרת שני convex hulls; (d) מודל המיוצר בעזרת חמישה convex hulls (Kim ואחרים 2005)

Lee ואחרים (2009) מציעים שיטה מבוססת-לייזר למציאת מסלול הנפה בעבור עגורן צריח רובוטי. הכותבים מניחים קיום מודל ממוחשב של אתר הבנייה - Building Information Modeling (BIM). תחילה, המערכת מקבלת מזהה (identifier) בעבור הפריט אותו נדרש להניף ממאגר נתונים מרכזי המכיל את ה-BIM התלת-ממדי. פועל בשטח, בעזרת GPS וקורא RFID, מאתר את הפריט באזור האחסון. מסלול ההנפה מתוכנן ממיקום אזור הנפת הפריט כנקודת התחלה ועד מיקום אזור פריקת הפריט כנקודת הסיום. לאחר חישוב המסלול, מניע העגורן את הפריט לאורכו. המסלול בפועל שונה מהמסלול המתוכנן, למשל בגלל פיתול הכבלים, רוח, או משקל הפריט המונף. לכן, המסלול בפועל מוקלט, ובמידה שקיים שינוי בינו לבין זה המחושב, המערכת שולחת תיקונים לעגורן הרובוטי. השימוש בלייזר נעשה למטרת מדידת מרחק ליניארי בין ציר הסיבוב של עגורן הצריח לעגלה (trolley) ומהעגלה לוו הנשיאה (ר' איור 3-28). כמו כן נעשה שימוש בחיישן

למידת אוריינטציית הזרוע של העגורן. כיוון שזו מערכת רובוטית, אין בעיה של "הנפות עורות". השיטה נוסתה בתנאי מעבדה פנימיים וחיזוניים ועמדה בהצלחה לפני שנוסתה גם בשטח. בנוסף לכך, הכותבים מציעים שיטה להתמודדות עם בעיית הנדנדוד (sway), בעיה הבאה לידי ביטוי כאשר הפריט המונף תלוי מהעגורן באוויר, ובעקבות תנועת הזרוע והרוח, הכבל שמחזיק את הציוד לעגורן אינו ניצב בדיוק לקרקע, ולכן קרן הלייזר אינה מוחזרת מו הגרירה אלא מהקרקע עצמה או מאובייקט שנמצא בין וו הגרירה לקרקע. הפתרון הוא על ידי אלגוריתם המתחשב במהירות ההנפה, ערך z התחלתי של הוו וערך z של הנקודה הנוכחית, ומדידת הפרש זמן בין תחילת ההנפה לנקודה הנוכחית. האלגוריתם מבצע חישוב של מהירות על פי ערכי z מהדגימות. במידה שהמהירות המחושבת נמצאה בין אפס למהירות המקסימאלית של העגורן, ניתן להסיק שמדידת המרחק נכונה. במידה שהמהירות המחושבת לא מקיימת את התנאי, הגובה הנוכחי של הוו מחושב על ידי מהירות ההנפה שנמדדה, זמן ההנפה, וגובה תחילת ההנפה.



איור 3-28 מיקום חיישני הלייזר על העגורן: חיישן לייזר אחד מורכב על החיבור בין הזרוע של העגורן לתורן והוא מודד את המרחק r – המרחק האופקי לעגלה (trolley), ואילו חיישן הלייזר השני מורכב על העגלה ומודד את המרחק z – המרחק האנכי לו. המקודד אחראי על מדידת זווית הסיבוב θ (Lee ואחרים 2009)

3.3.2 מצלמות טווחים

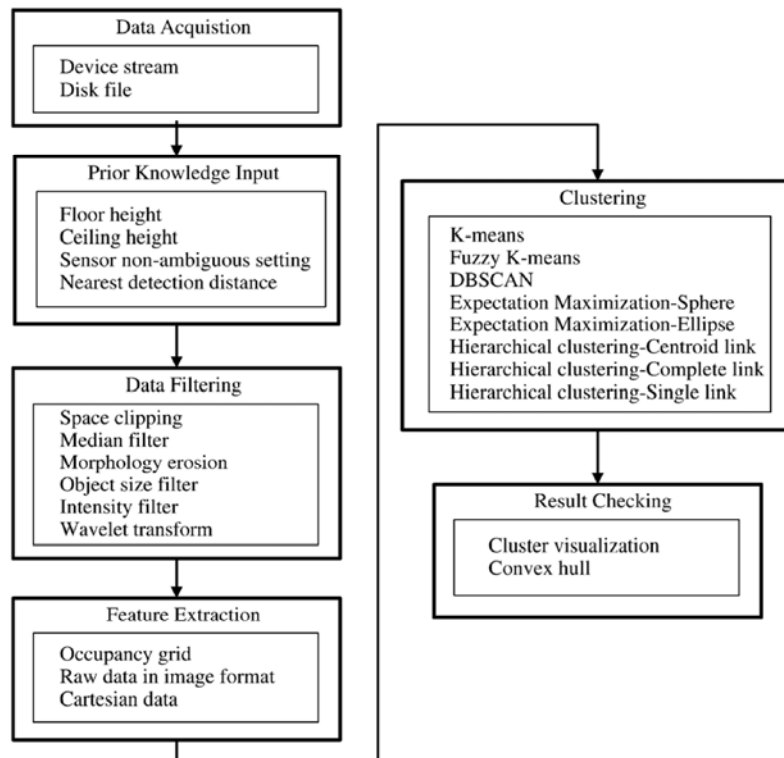
מצלמת טווחים היא מצלמה בעלת חיישן ובו מערך של רכיבים בעלי קיבול המייצרת תמונה שבה כל פיקסל מייצג את המרחק לאובייקט ואת עוצמת החוזר שלו. יתרונה של מצלמת הטווחים על סורק לייזר בא לידי ביטוי בגודלה ומשקלה הנמוך יחסית, עלותה הנמוכה, ומהירות קבלת המידע הנרכש. חסרונה הבולט נמצא ברזולוציה הנמוכה בהרבה מזו של סורק לייזר קרקעי.

Lytel ואחרים (2005) מבצעים הערכת ביצועים של מצלמת טווחים למידול אתרי בנייה. המצלמה עוברת כיוול בעזרת אלגוריתם המחשב פרמטרים פנימיים של העדשה (תיקונים לעיוותים רדיאליים) וה-CCD וסטיית מדידת המרחק. בעזרת המצלמה המכוילת בוחנים הכותבים את

ביצועי המצלמה על ידי מבחני תפקוד בטווחים שונים (מ-1 מטר ועד 7 מטר במרווחים של מטר, ובזווית פגיעה של 0°).

Gong ו-Caldas (2008) בודקים יעילותם של אלגוריתמים שונים בעיבוד נתוני לייזר הנרכשים בעזרת flash laser (Swiss Range Finder SR-2) על בסיס ממשק למשתמש שנבנה למטרה זו. מכיוון שעבודות רבות באתרי בנייה דורשות ניתוח נתונים הנרכשים בעזרת לייזר בזמן-אמת, עולה צורך בפיתוח שיטות יעילות למידול מקומי מהיר. לשם כך, נבדקו שיטות שונות של סינון רעשים, feature extraction והקבצה (clustering) כמו גם השילובים ביניהן, הן מבחינת מהירות החישוב והן מבחינת דיוק ההקבצה, המתקבל בעזרתן (מספר הקבוצות שנמצאות לעומת מספר האובייקטים בסצנה). הכותבים חילקו את עיבוד נתוני הלייזר לשישה שלבים (ר' איור 29-3), כאשר בכל שלב קיימות מספר שיטות שכיחות אפשריות.

לשם בדיקת יעילות האלגוריתמים השונים, נאספו נתוני לייזר בשתי סצנות שונות: האחת בפנים בניין והשנייה מחוצה לו – באתר בנייה, בו הסצנה מסובכת יותר (שכן יש בה יותר פרטים בחוסר סדר). נתוני הלייזר הועלו בממשק Matlab, בו ניתן לבחור בכל שלב בתהליך העבודה (ר' מגוון האפשרויות באיור 29-3) את האלגוריתם הנבדק, ולשלב אלגוריתמים שונים בכל שלב. הכותבים ביצעו מספר ניסויים בעזרתם נבדקה יעילות המידול בשימוש באלגוריתמים השונים: בתחילה, לא השתמשו הכותבים בפילטריזציה כלל וכן לא השתמשו בידע מוקדם על הנתונים (כגון: גובה רצפה, גובה תקרה) אך נעשו שילובים שונים של חילוץ מאפיינים ו-clustering. לאחר מכן ה-clustering והמאפיינים נעשו לאחר שנעשתה פילטריזציה, עדיין ללא שימוש בידע קודם בנוגע לסצנה; ולבסוף נעשה שימוש בכל השלבים המתוארים באיור 29-3, בשילוב האלגוריתמים השונים המפורטים שם. מסקנת הכותבים הייתה כי שימוש בפילטריזציה, כגון: טרנספורמצית wavelet, פילטר מורפולוגי, פילטר חציוני, ומסנן עוצמות נמוכות (low intensity filter) מקלים על השלבים הבאים אחריהם, חילוץ מאפיינים ו-clustering. בשלבים הבאים, אומרים הכותבים, הקבצה מבוססת-DBSCAN בשילוב עם occupancy grid מובילים לתוצאות מדויקות ומהירות ללא התערבות מפעיל, למרות שמספר פרטים נעלמים מהאובייקטים, ולכן השילוב מתאים לעיבוד בזמן-אמת. בשונה מהקבצה זו, לצורך הקבצה המבוססת על K-means על רשת בלתי סדורה, נדרש ידע קודם בנוגע לסצנה והתוצאה המתקבלת היא מפורטת יחסית, בנוסף להיותה מדויקת ומהירה.



איור 3-29 תרשים עיבוד נתוני הלייזר והאפשרויות השונות ליישום כל שלב
(2008 Caldas-i Gong)

Son ואחרים (2010) מציעים שיטה אוטומטית לאיתור ומידול תלת-ממדי של כלים כבדים בעזרת מצלמת טווחים. מצלמת טווחים היא מצלמה בעלת חיישן ובו מערך של רכיבים בעלי קיבול המייצרת תמונה שבה כל פיקסל מייצג את המרחק לאובייקט ואת עוצמת ההחזר שלו. התהליך המוצע מורכב מארבעה שלבים עיקריים: (1) שלב הקלט – בו מתקבלת תמונה דו-ממדית ממצלמת הטווחים שבה כל פיקסל מתאר מרחק; (2) העיבוד המקדים – בשלב זה מתבצעת החלקה של התמונה לסילוק רעשים וסינון "כתמים" בעזרת פילטרים שונים, ובנוסף מבוצעת גם הסרה של פיקסלים המזוהים כקרקע; (3) סגמנטציה בעזרת "פיצול ומיזוג" (split and merge), כך שהנקודות בענן ממוינות לסגמנטים; ו-(4) חיבור כל הנקודות השייכות לסגמנט אחד והפיכתן לאובייקט סגור תלת-ממדי בעזרת convex-hull. הכותבים מציינים כי החיסרון העיקרי בשיטה המוצעת הוא הצגת הפרטים, זאת מכיוון שהם מוצגים באופן מופשט בלבד, מעצם השימוש בתמונת טווחים.

3.3.3 חיישני אולטרא סאונד

Gomez ואחרים (2005) מתארים שימוש בסורק אולטרא סאונד לצרכי מידול מבנים דמויי צינור. מאמר זה נכתב בעיקר בעבור שימוש במקרים של צינורות ביוב. המטרה היא פיקוח על צינורות הביוב כדי למצוא בהם פגמים או ירידה ביכולת הזרימה. השיטה הרווחת כיום משתמשת בטכנולוגית טלביזיה במעגל סגור (CCTV). מטרת השימוש בסורק האולטרא סאונד היא ליצור

פרופיל תלת ממדי מפורט של השטח הפנימי של הצינור אשר בעזרתו ניתן יהיה להעריך את מצבו הפנימי של אותו צינור, כמו למשל מצב המשקע בתוכו, קיום עשבייה, עיוות דפנות הצינור, וגילוי סדקים.

3.4 סיכום

סקר הספרות מראה שימושים רבים של סורקי לייזר בתחום הבנייה, בעיקר בתחום הפיקוח וניהול הבנייה ובמידת דפורמציות במבנים.

מסקנה חשובה מסקר הספרות, בהקשר של המחקר הנוכחי, היא שלא אותר דרך חיפוש במאמרים מחקריים המיישמים את טכנולוגיית הלייזר כל מחקר העוסק באופן ספציפי בעגורנים. המאמר היחיד שאותר שכן נוגע בנושא הוא המאמר של Lee ואחרים (2009). מאמר זה, אשר מטפל בבטיחות בעבודה עם עגורנים ובהנפות עוורות, מיישם אמנם שימוש בלייזר, אך בצורה מוגבלת, כפי שהדבר בא לידי ביטוי בשימוש במד-טווח בלבד ולא בסורק לייזר.

4. מתודולוגיה

4.1 אפיון אתר הניסוי

בהתאמה למטרות המחקר ולדרישות שמציב השימוש בסורקי לייזר, וכדרישות סף למחקר בכלל, יאופיין אתר הניסוי ה"אידיאלי" כדלקמן:

1. עגורן עסוק מאד משך היום.
 2. עגורן עסוק מאד ברציפות על פני השבוע.
 3. בניין עם מטלות הנפה חזרתיות/טיפוסיות.
 4. בניין עם מטלות הנפה מגוונות.
 5. בניין שבשלב המדידות אינו גבוה מאד.
- המסקנה המתבקשת כבר בשלב זה, מהאפיונים דלעיל: בניין שמיועד להיות רב-קומות, ואשר נמצא כבר בשלב הקומות הטיפוסיות עד כ-10 קומות, דהיינו, לא בחניון, לא קומות קרקע, ולא במלוא גובהו.

אפיונים חשובים נוספים:

6. כמות ניכרת של הנפות עוורות.
7. מצלמה (דהיינו, עזר ראייה לעגורנאי, המאפשר לו "לראות" את המטען המונף גם ב"שטח מת"; ראה סעיף 2.5.2 בסקר הספרות): רצוי עגורן ללא מצלמה (באשר ניתן אז להשתמש במדידות משך זמני המחזור גם לצורך בדיקת יעילות עבודת העגורן, הגברת פריון העבודה, וכיו"ב), אבל גם אם מותקנת מצלמה בתא העגורנאי, אין הדבר פוגם במחקר המתמקד בנושא מגבלות ראייה בהיבט הגיאומטרי.
8. נגישות גיאומטרית להצבת מכשיר הלייזר: סביב הבניין, מכל צדדיו, נדרש רווח מספיק לצורך הצבת סורקי לייזר במיקומים שונים ובמרחק הדרוש.
9. רצוי: קיום מכשולים/הפרעות נוספות (לאו דווקא לקו הראייה) – משרדים באתר, כביש קרוב ממנו פורקים משאיות, וכיו"ב.
10. עגורן נוח לטיפוס.

11. עגורן שמאפשר שהייה נוחה של המודד יחד עם העגורנאי בתא (תא לא קטן מדי).
12. שיתוף פעולה מלא של חברת הבנייה באופן כללי ושל בעלי תפקידים שונים, ובעיקר מנהל הפרויקט ומנהל העבודה, בפרט (יותר מאשר רק "הסכמה").
13. פעילות עגורן (שגרתית) גם בימי שישי (מתחייב מההכרח לבצע חלקי מהבדיקות והמדידות באתר ביום זה).
14. אתר לא רחוק (קו חיפה-ת"א).
15. שיתוף פעולה מצד העגורנאי (ואם באתר יש יותר מעגורן מתאים אחד, ייבחר זה המופעל ע"י עגורנאי מתאים יותר לשיתוף פעולה במחקר זה – שפה, תקשורת, הבנה, ניסיון).
- כאמור לעיל, אלה הם האפיונים של אתר "אידיאלי", ולכן יש להגדיר מה מתוכם יהיו אפיוני חובה (כאשר כל היתר יהיו בגדר הרצוי בלבד). אפיוני החובה אותרו כדלקמן: מס' 1-4, 6, 8, 12, 13, ו-15.

4.2 בדיקת אתרי ניסוי אפשריים

נבדקו מספר אתרים ונמצאו בלתי מתאימים. לדוגמה, אתר פרויקט "רוטשילד 30" בתל אביב (ביצוע: חברת אלקטרה בנייה). אתר זה נבדק ונמצא לא מתאים כי לא עומד בתנאי 8 דלעיל: כפי שניתן לראות באיור 1-4, המבנים משני צדי הבניין הנבדק (ממערב וממזרח) קרובים אליו מאד ואינם מאפשרים הצבת סורקי לייזר במרחק המינימלי הנדרש. גם מצדו האחורי של הבניין המגרש צר ביותר, וכמו"כ זהו שטח ההתארגנות והאחסון היחיד באתר, ואין כל אפשרות טכנית – גם אם המרחק כן היה מאפשר זאת – לבצע ממנו מדידות.

חזית הבניין הראשית, הגם שלכאורה מאפשרת הצבת מכשור המדידה מבחינת המרווח הגיאומטרי, מהווה גם היא בעיה, באשר לא נראה מעשי להציב סורקי לייזר ללא הפרעה בשדרות רוטשילד בתל אביב.

מסיבה זו, והגם שהתאים מאד מהרבה בחינות אחרות (שיתוף פעולה מצד חברת הבנייה, גובה מתאים, מטלות הנפה מגוונות וחזרתיות, היקף עבודה גדול של העגורן כאשר מרבית ההנפות בשטחים "מתים", ועוד), נפסל הבניין לשמש כאתר ניסוי.



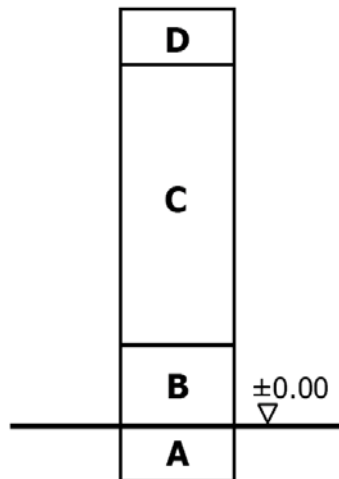
איור 4-1 אתר "רוטשילד 30"

(מימין: צד מערב, עם העגורן צמוד ממש לקיר הבניין; משמאל: צד מזרח)

4.3 אתר הניסוי הנבחר

האתר הנבחר הינו פרויקט "Sky עיר ימים" בנתניה (אזור פולג); חברת הבנייה המבצעת: דניה סיבוס. זהו בניין מגורים שמתוכנן להתנשא לגובה 34 קומות (110 מ'). נתוני הבניין הבסיסיים והנתונים הרלוונטיים למחקר זה הינם כדלקמן:

- חלוקת הקומות (ראה איור 4-2):
- A: קומת מרתף בגובה 3.85 מ'
- B: קומת כניסה כפולה בגובה 6.00 מ'
- C: 28 קומות טיפוסיות בגובה 3.00 מ' כ"א
- D: 4 קומות עליונות בגבהים משתנים, ס"ה 14:00 מ'
- שטח קומה טיפוסית 800 מ"ר, מזה גרעין 200 מ"ר.
- בטון יצוק באתר, קרוב ל-400 מ"ק לקומה.
- קירות מחופים אבן בשיטת ברנוביץ'; הרכבת האבן: 70% בקומה, 30% למטה.



איור 4-2 תאור חלוקת הקומות

- ציוד עיקרי: שני עגורני צריח, חיצוניים, רתומים לבניין משני צדדים נגדיים. כל עגורן מכסה בעצמו את כל שטח הקומה, בחפיפה מלאה. הדרישה לשני עגורנים נובעת מאילוץ זמן תעסוקה, לא מאילוץ גיאומטריים. עפ"י תכנון, כל עגורן משרת את חלק הקומה הסמוך אליו ושני העגורנים יחד משרתים, בחפיפה, את החלק האמצעי של הקומה. בפועל, העגורנים נותנים גיבוי זה לזה, בכל שטח הקומה, עפ"י מצב התעסוקה ובעת השבתה זמנית (כגון בעת טיפוס העגורן וההמתנה לבדיקה ואישור המשך העבודה שלאחר הטיפול).
 - טפסות: תקרות – שולחנות למרפסות, טפסות קונבנציונליות לשאר התקרה; קירות – טפסות פלדה גדולות (בהתאמה לשיטת ברנביץ'); גרעין – טפסות פלדה (פנימיות מתכונות).
 - מטלות הנפה עיקריות: טפסות לקירות, לגרעין, ושולחנות; יציקת בטון; פלדת זיון; קורות טרומות (דקורטיביות, ארבע חתי' לקומה).
 - קצב ביצוע: כשלוש קומות בחודש.
 - האתר פתוח, ללא מגבלות שטח אחסון והתארגנות וללא מבנים סמוכים; רוחות חזקות (האתר מרוחק רק כ-200–300 מ' מהים).
 - העגורנים עובדים במצב של "הנפות עוורות" בחלק ניכר מזמני המחזור של מטלות השינוע.
- טבלה 4-1 מציגה את התאמת האתר הנבחר "עיר ימים" לדרישות המחקר שהוצבו בשלב האפיון, כמתואר בסעיף 4.1. איורים 4-3 עד 4-9 מציגים את האתר הנבחר.

טבלה 4-1 התאמת האתר הנבחר לאפיון (בצהוב: דרישות עיקריות)

מס' סד'	דרישה מאתר הניסוי	עומד בצורה מלאה	עומד בצורה חלקית	לא עומד כלל
1	עגורן עסוק במשך היום	✓		
2	עגורן עסוק ברציפות בשבוע	✓		
3	מטלות הנפה חזרתיות	✓		
4	מטלות הנפה מגוונות	✓		
5	גובה לא רב בזמן מדידות			✓
6	הרבה ענפות עוורות	✓		
7	ללא מצלמה			✓
8	נגישות להצבת סורק הלייזר	✓		
9	אובייקטים נוספים באתר		✓	
10	עגורן נוח לטיפוס		✓	
11	תא עגורנאי נוח למדידות		✓	
12	שיתוף פעולה מחברת הבנייה	✓		
13	עגורן עובד בימי שישי	✓		
14	אתר לא רחוק		✓	
15	שיתוף פעולה מצד העגורנאי	✓		



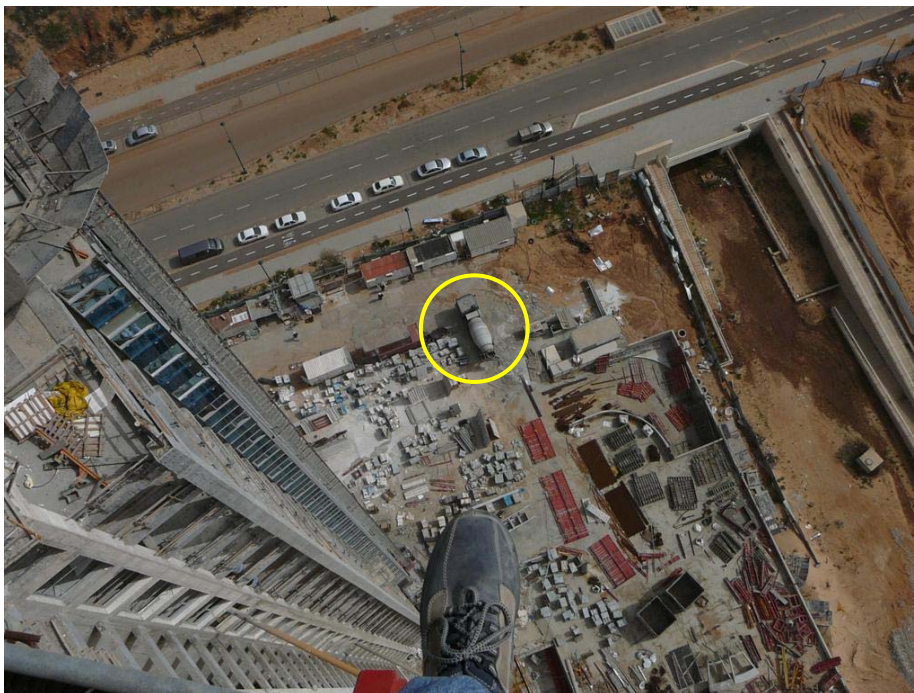
איור 4-3 אתר הניסוי: הבניין ועגורן הניסוי



איור 4-4 אתר הניסוי: שני עגורנים חופפים
(בשני שלבים שונים של התקדמות הביצוע)



איור 4-5 אתר הניסוי: פוטנציאל להנפות עוורות



איור 4-6 אתר הניסוי: תרחיש טיפוס להנפה מהקרקע



איור 4-7 אתר הניסוי: תרחיש טיפוס י להנפה בקומה



איור 4-8 אתר הניסוי: מצלמה כעזר ראייה
(מימין: המצלמה על הזרוע הקדמית של העגורן; משמאל: תקריב של מתקן המצלמה)



איור 4-9 אתר הניסוי: צג המצלמה (מצד ימין) בתא העגורנאי

4.4 תאור תהליך סריקת הלייזר

4.4.1 כללי

טרם ביצוע הסריקה הוחלט לצורך המחקר לבצע מספיק מדידות בכדי לקבל תאור מלא של הבניין והעגורן. על מנת לקבל מידע מספק היה צורך בהעמדת המכשיר לפחות בשלושה מיקומים שונים. בכדי לקבל בוודאות את המידע הדרוש ובנוסף כמה שיותר מידע גם על סביבת העבודה נסרק האתר ב-28/11/2010 מארבע עמדות שונות כאשר כל עמדה נמצאת מול חזית שונה של הבניין.

הסריקות התבצעו בעזרת סורק ה-Leica ScanStation 2 (איור 4-10, 4-11) בעל קצב מדידה של עד 50,000 נקודות לשניה, בדיוק של 6 מ"מ בקביעת מיקום ו-4 מ"מ בקביעת מרחק ממרחק של עד 50 מ' ברמת מובהקות של סיגמא אחת ובצפיפות של פחות מנקודה למ"מ גם בציר האופקי וגם בציר האנכי. שדה הראייה של הסורק הינו 360 מעלות בציר האופקי ו-270 מעלות בציר האנכי.

4.4.2 קביעת מיקום עמדת מכשיר

בחירת מיקום הסורק דורשת התייחסות אל הדרישות הבאות:

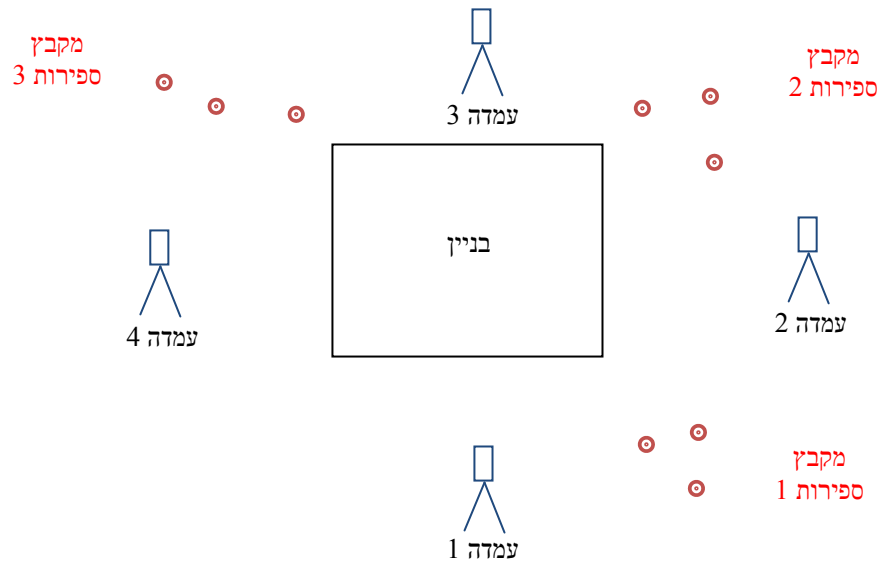
1. מרחק הסורק מהאובייקט (הבניין) – ככל שסורק הלייזר רחוק מהאובייקט עליו נדרש לקבל מידע, צפיפות הנקודות לתא שטח מסוים קטנה. מצד שני, קיימת מגבלת הזווית האנכית (שבמקרה הנוכחי היא קריטית, בשל גובה הבניין), שאינה מאפשרת סריקה של אזורים גבוהים מקרוב.
 2. ראות לשני אזורים משותפים, האחד מהעמדה הנוכחית לעמדה הבאה והשני ומהעמדה הנוכחית לעמדה הקודמת (איור 4-12). בכדי לבצע עיגון (ראה סעיף 3.1.2 בסקר הספרות), הוצבו בין כל שתי סריקות שלוש ספירות (כדורים בהם משתמשים לצורך עיגון סריקות הלייזר) שנשארו סטטיות בין הסריקות (איור 4-13). מכל סריקה נמצאו מרכזי אותן ספירות לצורך עיגון ענני הנקודות השונים, המתקבלים מכל סורק במערכת מקומית שונה, לכדי ענן נקודות במערכת אחת (ר' פרוט התהליך בפרק 6).
 3. תכנון מיקום עמדות המכשיר לקבלת כיסוי מלא של השטח (הבניין). על מנת ליעל את העבודה ולהוריד דרגות חופש בבחירת העמדות, נבחרו ארבע העמדות מול ארבע החזיתות של הבניין.
- לאחר תכנון ובחירת כל העמדות, בוצעו המדידות אל הבניין מכל עמדה ובנוסף נסרקו מכל עמדה (ברזולוציה גבוהה מאוד) גם הספירות המקשרות את הסריקה הנוכחית לסריקה הבאה ואת הסריקה הנוכחית לסריקה הקודמת.
- לאחר הרכשת המידע מהסורק נעשה שימוש בתכנת Cyclone של Leica לקביעת מרכזי הספירות ועיגון ענני הנקודות.



איור 4-10 סורק הלייזר Leica ScanStaion 2



איור 4-11 סורק הלייזר מול הבניין בזמן מדידה



איור 4-12 סכימה המתארת את מהלך הסריקה



איור 4-13 ספירות (כדורים) המשמשות לעיגון סריקות הלייזר (מימין: ספירה על חצובה; משמאל: תקריב של ספירה על רקע סורק הלייזר)

4.5 תצפית מתא העגורנאי

לאחר ביצוע המדידות בעזרת סורק הלייזר, הוסק שיש חשיבות ברכישת היכרות אינטימית יותר עם הנושא, על ידי תצפיות מתא העגורנאי. החלטה זו נבעה מהצורך לקבל תחושה אמיתית ואמינה יותר של מהלך עבודה טיפוסי של העגורנאי, להתנסות בתנאי עבודתו המגבילים, ובעיקר לראות ולחוות את הקושי בעבודה של העגורנאי בזמן הנפה עיוורת.

לצורך כך נקבע מועד לטיפוס על העגורן. מועד זה היה צריך לקיים את התנאים הבאים:

- תנאי מזג אוויר מתאימים. בשל עונת החורף היה דרוש לדאוג שלא ירד גשם ולא יהיו רוחות עזות (האתר כ-200 מ' מהים) ביום הטיפוס.
- מהלך עבודה טיפוסי הכולל עבודה רציפה של העגורן.
- תיאום עם מנהל הפרויקט ומנהל העבודה באתר לצורך קבלת אישור לטיפוס על העגורן.
- תיאום עם העגורנאי, על מנת לוודא שיהיה במהלך עבודה ושאינו נמצא בהפסקה או בחופשה.

צוות המחקר טיפס פעמיים לעגורן, ב-13/01/2011 וב-25/02/2011 (איור 4-14), ושהה בכל פעם בתא העגורנאי כשעה (איור 4-15). ניתן היה לעקוב אחרי מטלות יציקת בטון, להתרשם כיצד אורגן האתר כך שמשאיות הבטון המובא תהיינה בעת העמסת הדודים בתוך שדה הראייה של העגורנאי (ר' סימון באיור 4-6 ותקריב באיור 4-16), ללמוד כיצד גורמות הנפות עוורות לכך שהיכולת המעשית של העגורנאי להפעיל בו-זמנית מספר תנועות (כגון הרמה וצידוד) פוחתת (הגם שהתא היה מצויד במצלמה), וכיוצא בזה. כמו-כן נוצל הטיפוס לעגורן לתיעוד צילומי מזרוע העגורן של אזורי ההנפה, קבלת תמונה פנורמית של כל מעטפת העבודה של העגורן, ועוד (איור 4-17). בדיעבד, עוד יותר מאשר במחשבה שהביאה מלכתחילה להחלטה לטפס לעגורן, אין ספק שתצפיות אלה היו חיוניות להבנת הנושא ותרמו לאינטגרציה בין סריקות הלייזר לבין המעקבים והמדידות הידניות (ר' פרק 7)

יודגש שלא מדובר כאן, בשתי שהיות אלה בתא העגורנאי, במדידות הידניות שנערכו מספר גדול של פעמים מהתא, והמתוארות בפרק 5, אלא בפעולה שמשלימה את סריקות הלייזר ושסייעה, בין היתר, להבנה טובה יותר של הנושא לצורך פיתוח האלגוריתמים בהמשך (ר' פרק 6)



איור 4-14 טיפוס על העגורן



איור 4-15 תצפית מתא העגורנאי



איור 4-16 משאית הבטון המובא ממוקמת כך שתהיה בשדה הראייה של העגורנאי



איור 4-17 תיעוד האתר ואזורי ההנפה מזרוע העגורן לצורך המחקר

5. מדידות ידניות

5.1 מטרת ויעדי העבודה

המטרה העיקרית של המדידות הידניות היא לאתר גורמים משפיעים על מחזורי עבודתו של עגורן הצריח ולבחון כמותית את פרקי זמן עבודתו בשטח מת. מול סריקות הלייזר, נגזרות ממטרה עיקרית זו שתי מטרות משנה: (1) לספק נתונים לצורך השוואה עם תוצאות הסריקות ואימותן; ו-(2) לספק נתונים משלימים לתוצאות הסריקות, שאין באפשרות האחרונות לספק (לדוגמה: סוג המטען המונף).

המדידות התבצעו באתר הניסוי, העובד עם שני עגורנים במקביל. בניין מגורים זה מתוכנן ל-36 קומות (מהן 28 קומות טיפוסיות-חזרתיות) ונבנה בשיטת "ברנוביץ" על ידי חברת דניה סיבוס. שיטה זו עושה שימוש נרחב בעגורני צריח כיוון שהיא מבוססת על עבודת סידור חיפוי האבן של הקירות בשטח ההתארגנות בקומת הקרקע אל תוך טפסות היציקה, הנפת הטפסות עם האבן והבאתן אל מיקומן המיועד על ידי עגורן, ולבסוף סידורן ויציקת בטון לתוכן כשאלה כבר מכילות את אריחי החיפוי עם עוגניהם היישר אל תוך היציקה. וריאציה של שיטת ברנוביץ המסורתית היא חיבור אריחי חיפוי האבן לטפסות בקומה (ולא על הקרקע), לאחר שאלה כבר הונפו ומוקמו במיקומן הסופי. באתר הניסוי יושמה בכ-70% מהקירות וריאציה זו של סידור האבן בקומה (כדי לחסוך זמן הנפות העגורן בגין האפשרות להעלות את הטפסות ישירות מקומה לקומה מבלי "לעבור" כל פעם במסלול הארוך דרך הקרקע).

בשיטת ברנוביץ יעילותו של העגורן היא נתון קריטי, כיוון שבימי עבודתו הוא מוצא עצמו עסוק הן עם הנפתן של טפסות חדשות ליציקות הבאות והן עם פירוקן של הטפסות בהן התקשה כבר הבטון (ועוד יותר כאשר ויש לטפל בהן שוב על הקרקע). תזמון מתוחכם ויעיל יכול לשנות את פני הפרויקט בעיקר בהיבטי יעילות וניצול משאבים.

במחקר זה נאספו מדידות יום וערב, יציקות ומטלות הנפה אחרות, עם עזר ראייה לעגורן (מצלמה) ובלעדיו, על מנת למצוא מאפיינים בזמני הנפות אלה שיביאו למסקנות שונות לגבי יעילות ניהול ההנפות. רוב המדידות בוצעו מתא העגורנאי ומיעוטן בוצעו מהקרקע (בעיקר יציקות) כדי לצפות בדיוק ברגע ההעמסה.

5.2 חלוקת האתר לאזורי עניין

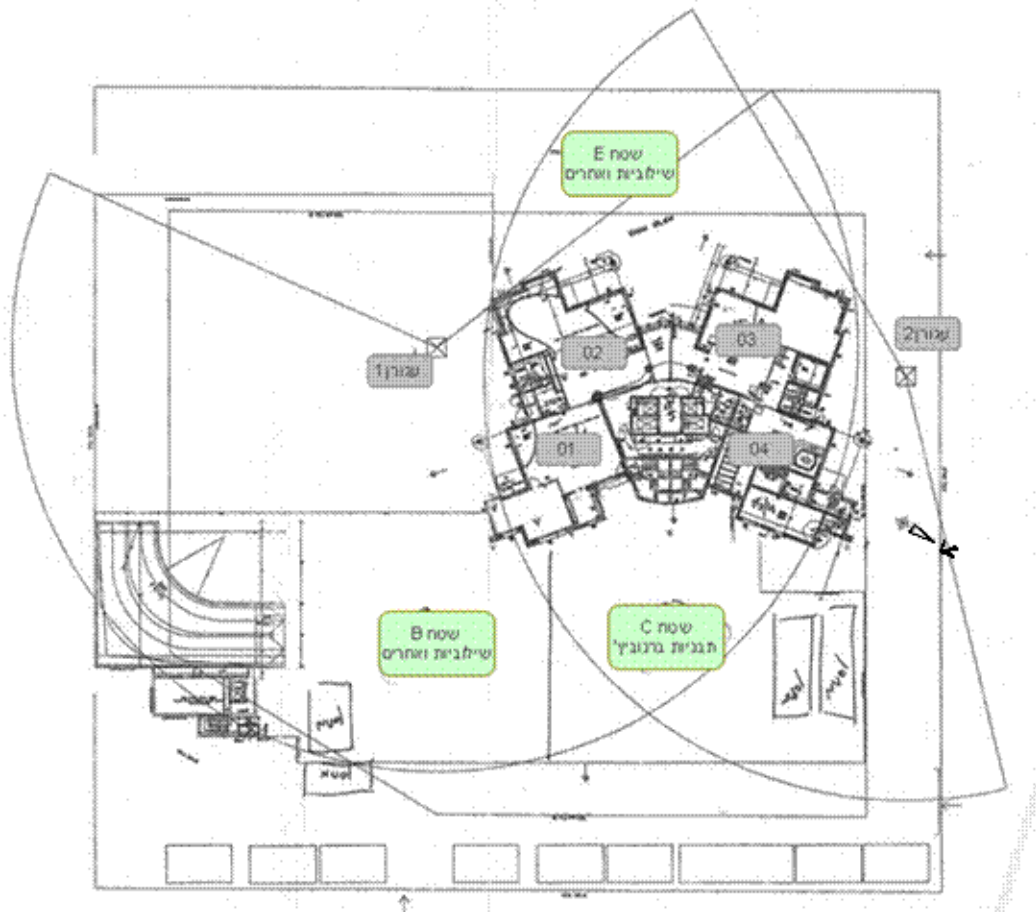
בשטחי ההתארגנות שבקומת הקרקע מופו שלושה שטחים עיקריים (ר' איור 5-1):

- שטח B: שטח שבשליטה מלאה לכל סוגי התנועות מבחינת העגורן. ההנפות אליו וממנו הן בקו ראייה ישיר.
- שטח C: שטח שברוב תקופות הבנייה באתר מוגדר "שטח מת", ללא קו ראייה ישיר וראות מוגבלת, גם בעזרת המצלמה.

• שטח E: השטח שאליו הגיעו משאיות הבטון, גם הוא בקו ראייה ישיר לעגורנאי.

(הערה: האזורים שמלכתחילה סומנו כשטח A ושטח D התבררו כאזורים לא רלוונטיים למחקר ולכן לא נזכרים כאן).

במבנה עצמו מופו ארבעה אגפים (ר' איור 5-1) על מנת להבדיל בין הנפות שהגיעו לנקודות שונות.



איור 5-1 אתר הניסוי: חלוקה לשטחים

5.3 מושגי יסוד בביצוע המדידות

לצורך רישום המדידות הוכנו טבלאות לצורך מילוי בשטח. בהכנת הטבלאות הושקעה מחשבה לצורך המחקר. על הטבלה להיות קצרה, ברורה, ונוחה לשימוש, מצד אחד, ועליה להכיל את כל המידע הדרוש לשם המחקר, מצד שני. על מנת להבין את הטבלה יש תחילה להכיר את מושגי היסוד הבאים:

זמן חצי מחזור – זמן הנמדד מרגע הגיע האנקול אל יעד הנשיאה הבא, עד שחרורו ממנו ביעדו החדש (בדרך כלל זמן זה מציג חצי מהמשימה כיוון שמשימות ההנפה כוללות גם הבאת האנקול בסיום אותה תנועה ליעדו הבא ולכן השם זמן חצי מחזור).

תחילת טעינה/פריקה – הרגע שבו מתחיל העיסוק במחזור ההנפה הנבדק. כלומר, אם זה מחזור שבו פורקים משא, למשל, הכוונה לרגע שבו מפסיק העגורן את פעולתו לצורך הבאת המשא לנקודה ומתחיל העיסוק במשא עצמו.

סיום טעינה/פריקה – השלב שבו העגורנאי מקבל אישור מהפועל המטפל במשא להתחיל להניע אותו ליעדו (ברוב המקרים הוא אותו הרגע שבו נמדדת "תחילת תנועה").

תחילת תנועה – הרגע שבו העגורנאי מתחיל להניע את המשא ליעדו (גם עגורן ריק החוזר לנקודת איסוף מתחיל תנועה).

תחילת הנפה עיוורת – הרגע שהחל ממנו העגורנאי אינו בקשר עין ישיר עם המשא אותו הוא מניף ונעזר במצלמת הוידאו או בקשר בלבד.

סוף הנפה עיוורת – הרגע שבו בתנועה המתרחשת חוזר קשר העין בין העגורנאי למשא אותו הוא מניף.

זמן הנפה עיוורת – משך הזמן בו ההנפה הייתה ללא קשר עין.

תאחוז הנפה עיוורת – תאחוז הזמן שבו לא היה קשר עין מתוך זמן המחזור הכללי. תאחוז זה מלמד על אופי אותה הנפה.

5.4 מדידות

מושגי היסוד דלעיל משמשים בכותרות הטבלה שהוכנה לצורך המדידות בשטח (איור 2-5). הטבלה מולאה במהלך המדידות בשטח (איור 3-5) והנתונים הוקלדו לאחר מכן בגיליון אלקטרוני (ר' נספח א') לביצוע ניתוחים ולהסקת מסקנות.

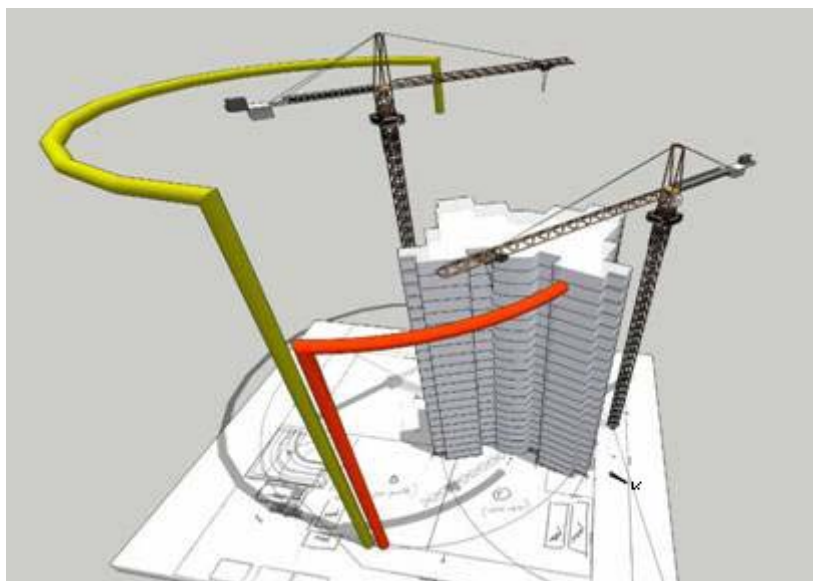
5.5 מסקנות

5.5.1 הנפות יוצאות דופן

במהלך המדידות נצפו מספר פעמים הנפות שלא בדרך הקצרה ביותר. סיבה אחת היא מתוך החשש למעבר בשטח מת. בהנפות כאלו הסיע העגורנאי את המשא במסלול אופקי מהשטח המת אל השטח הנצפה בגובה נמוך, לאחר מכן ביצע את המשך ההנפה כלפי מעלה במסלול אנכי, ולבסוף, הסיע העגורנאי את המשא שוב במסלול אופקי (תוך שילוב תנועה זוויתית – צידוד הזרוע – עם תנועה רדיאלית – הסעת העגלה לאורך הזרוע) לעבר נקודת הפריקה בקומה (ר' איור 4-5). סיבה שנייה היא מתוך החשש שהדרך הקצרה תהיה מלווה בחפיפת עגורנים, שהינה בעלת פוטנציאל הן לסיכון בטיחותי והן לעיכוב, ולכן העגורנאי בוחר דווקא בדרך הארוכה (ארוכה מבחינת אורך המסלול, אבל לא בהכרח מבחינת הזמן, שכן לאורך המסלול הארוך יותר אין עיכובים בשל מכשולים מהעגורן השני) (ר' איור 5-5).



איור 4-5 הנפה ארוכה יותר על מנת להימנע מהנפה בשטח מת



איור 5-5 הנפה ארוכה יותר (מסומנת בירוק) על מנת להימנע ממעבר בשטח חופף לפעילות העגורן השני, לעומת הנפה קצרה (מסומנת באדום)

5.5.2 תפקיד העגורנאי

בניגוד למה שמקובל לעתים לחשוב, העגורנאי אינו עוד "עובד מן המניין". מיקומו לאורך כל הפרויקט נותן לו יתרון עצום בתצפית ויכולתו לפרוץ בשידור לתוך רשת הקשר מאפשרת לו לעזור במקרים רבים "להציל את המצב". כפי שנצפה במהלך המדידות, קשה לשער כמה פעמים הציל העגורנאי את הפרויקט במקרים כאלה.

תכונותיו של עגורנאי טוב הן מעבר ליכולות טכניות בסיסיות: הוא חייב להיות בעל ראייה תלת-ממדית טובה – על מנת שזו תעזור לו להבין את מה שהוא רואה במרחב העבודה; סבלנות וניסיון הינן תכונות חשובות נוספות בעבודתו של העגורנאי. ישנם מקרים רבים בהם חוסר סבלנות וניסיון יכולים להוביל לתאונת עבודה או למקרה של כמעט תאונה. למשל, חליצה של טפסה סגורה (כזו הנחלצת מיציקה של פיר סגור) בחוסר סבלנות יכולה לגרום לתזווה פתאומית של העגורן קדימה ואחורה. מקרה כזה נצפה באתר והערכת הנדנוד הייתה באמפליטודה של כחצי מטר.

5.5.3 תקשורת בין העוסקים במלאכה

קשה שלא לדמות את אתר הבנייה המודרני לתיאורי התנ"ך למגדל בבל; כל אחד בשפת האם שלו עם בליל מילים מועטות בעברית. כך מוצא עצמו העגורנאי מנסה לתקשר עם עובד מסין שאמור לבצע בשבילו את מלאכת הקשירה של שרשרות העגורן לטפסה המונפת. העובד מחזיק ביד אחת את מכשיר הקשר ובידו השנייה מנסה לחבר בין השרשרת ללולאה. לפעמים מניח העובד את המכשיר במרחק מה ומטפל בהעמסה מבלי שהוא שומע את מה שמנחה אותו העגורנאי. בטבלאות המדידה ניתן לראות כיצד זמן קשירה זה מהווה את ההבדל בין מחזור הנפה מהיר

ויעיל לבין מחזור הנפה המתעכב והופך ארוך ומייגע (כל שאר רכיבי המחזור לא משתנים בהרבה בין מחזור אחד למשנהו).

כרעיון להמשך, שימוש במערכת אלחוטית המחוברת לאוזניו של הפועל ומאפשרת לו שתי ידיים פנויות ושמיעה טובה יותר של מה שמנחה אותו העגורנאי יכולה לקצר מאוד את זמן הקשירה וליעל את העבודה.

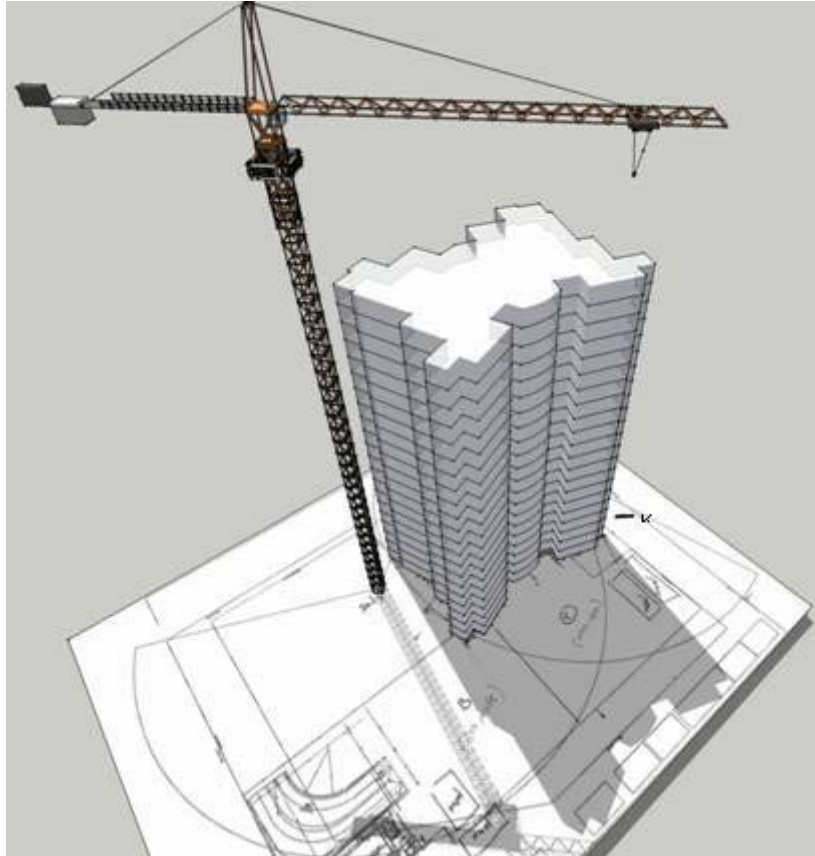
5.5.4 תכנון האתר במוכוונות ליעילות העגורן

באתרים בהם יעילות הנפות העגורן היא קריטית, נחוץ תכנון מקדים מיטבי של מיקומי הפונקציות השונות באתר בקומת הקרקע.

באתר המדידות סודר השטח בצורה שמיקמה את עיקר שטחי הפריסה של הטפסות באזור שממערב לבניין המוקם. פיזור זה גרם לכך שהחל משעות הצהריים הפך השטח למוצלל בצורה קיצונית על ידי הבניין עצמו, וניגודיות האור על פני הצל הייתה בלתי אפשרית מבחינת ראות העגורנאי (ר' איור 5-6). גם הצג בתא העגורנאי, חלק ממערכת המצלמה של העגורן, לא הצליח להתגבר על המכשול (בגלל השמש הנמוכה באותן שעות) וחלק נכבד ממשימות ההנפה קרו ללא וידוא ויזואלי של המפעיל.

סידור אחר של האתר (טפסות בדרום, למשל) היה מביא תוצאות אחרות. האזור הדרומי היה נשאר מואר כל שעות היום ללא הצללה ממבנים אחרים.

יציקות הבטון: מיקומן של נקודות ההעמסה של הבטון בשטחים שאינם נסתרים לעגורנאי הביאו לכך שלא היו כמעט משימות "עיוורות" הקשורות ביציקות בטון – יתרון זה הביא ליעילות רבה במשימות קריטיות אלה (ראה גם איור 4-6).



איור 5-6 הצללת אזור הטפסות באתר על ידי הבניין עצמו משעות הצהריים

5.5.5 הנפות בשעות החשיכה

שעות החשיכה מאופיינות בעבודה קשה יותר מבחינת העובדים הבודדים שנותרים לעשות אותה. בד"כ תהיה עבודה זו קשורה ביציקה עצמה. לצורך העבודה בשעות אלו מצויד העגורן בפנסים חזקים (ר' איור 5-7) העוזרים להבחין בדברים החשובים גם כשממש חשוך. הבעיה האמיתית היא המעבר האיטי בין היום לבין הלילה. מצד אחד לא מספיק חשוך כדי להבחין בעצמים בזכות האור המלאכותי, ומצד שני לא מספיק מואר כדי להסתפק בתאורה טבעית (ר' איור 5-8). התאורה הופכת לחסרת ניגודיות לגמרי וזהו זמן שמקשה על העבודה. למרות כל זאת לא נצפו תוצאות חריגות בנוגע ליעילות זמני ההנפה בשעות אלו.



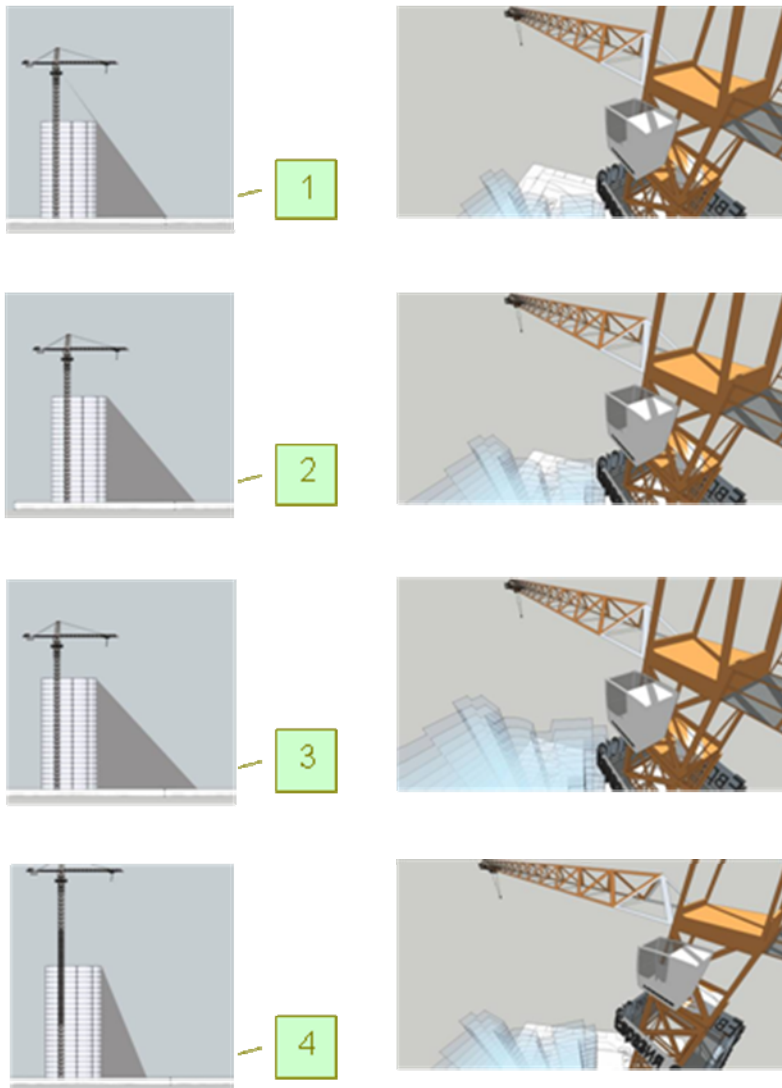
איור 5-7 פנסי העגורן בשעות החשכה



איור 5-8 עבודת העגורנים בזמן המעבר בין יום ללילה

5.5.6 השפעת היחס בין גובה הבניין לגובה העגורן על כמות השטח הנסתר

יחס הגבהים בין הבניין לעגורן משתנה תכופות בזמן הבנייה. גובה העגורן משתנה כל פרק זמן מסוים, אך בתוך פרק זמן זה הבניין הולך וגובה והעגורן נשאר באותו גובה. בתקופות בהן מטפס הבניין והעגורן נשאר בגובהו, גדל השטח המת (לא בצורה לינארית – ככל שהבניין גדל, השטח המת גדל בהרבה יותר). תופעה מציקה זו מצטמצמת רק בעיתות הגבהת העגורן, כך שהזמן הכי קשה לעגורנאי הוא לפני ההגבהות של העגורן (ר' איור 5-9).



איור 5-9 השתנות האזור המת כתלות בגובה היחסי בין הבניין לעגורן

5.5.7 עבודה בשני עגורנים במקביל

זוג העגורנים באתר אמור לעבוד בסינרגיה מלאה. האחד (בדרך כלל הגבוה) הצופה על השני יודע לומר לו על דברים חשובים בזמן אמת ברשת הקשר.

האי-יעילות מתחילה כשהעגורן האחד עובד על אלמנט בבניין המצריך חפיפה עם אזורי העבודה של העגורן השני (ר' איור 5-10). מצב זה גורם לאחד משניים – או עבודה תוך כדי קירבה מסוכנת, שבמקרים רבים נגמרת שניות מאסון, ובכל מקרה מאיטה את העבודה, או לחילופין, עבודה במחזורי הנפה ארוכים הכוללים הנפת המשא לצורך הגעה לאותה נקודה בהקפה ארוכה של השטח (מופיע בחלק מהמידות).

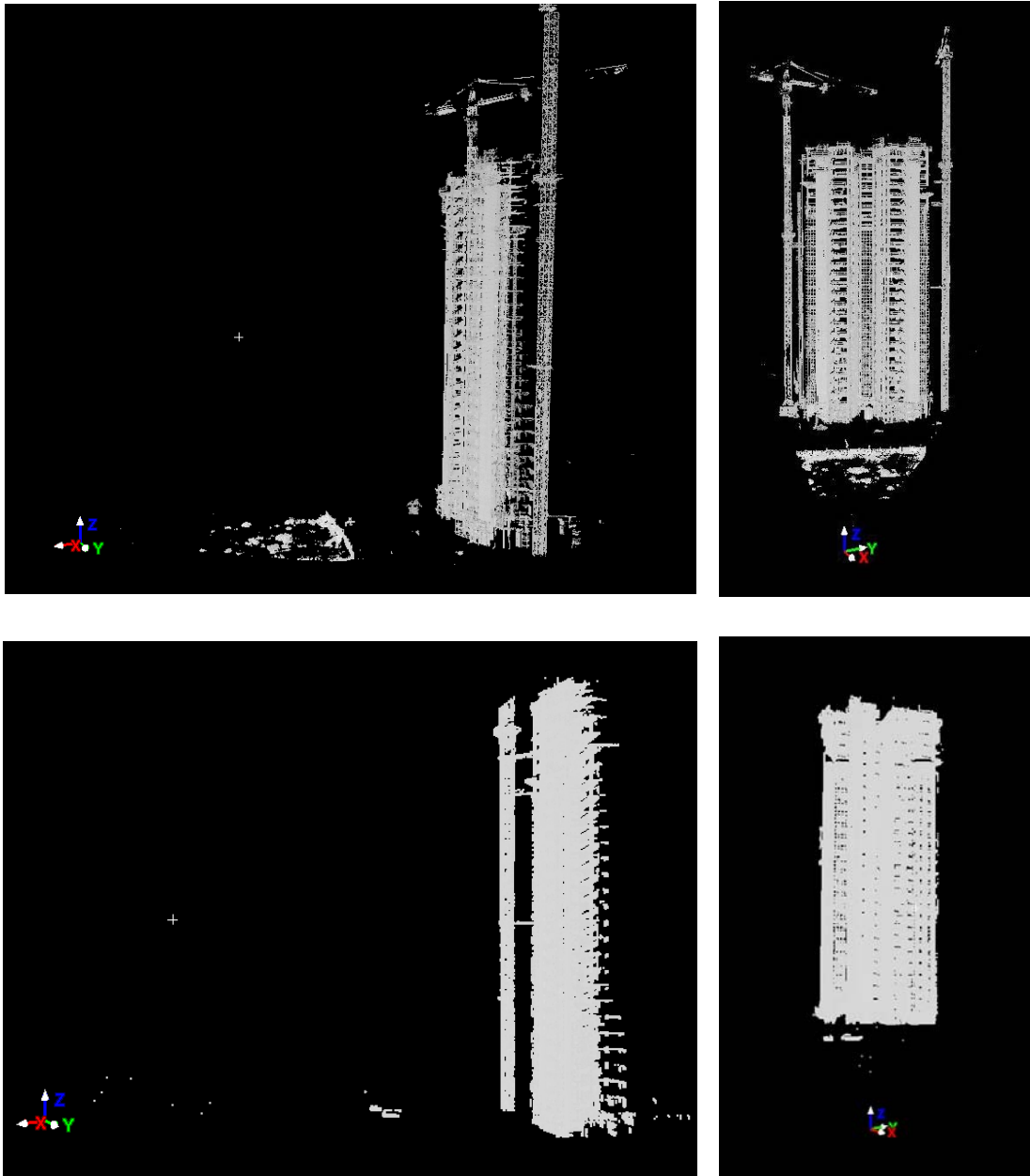


איור 5-10 עגורן הניסוי יוצק בטון בשטחו של העגורן השני

6. סריקות הלייזר

6.1 סריקה מכל עמדה

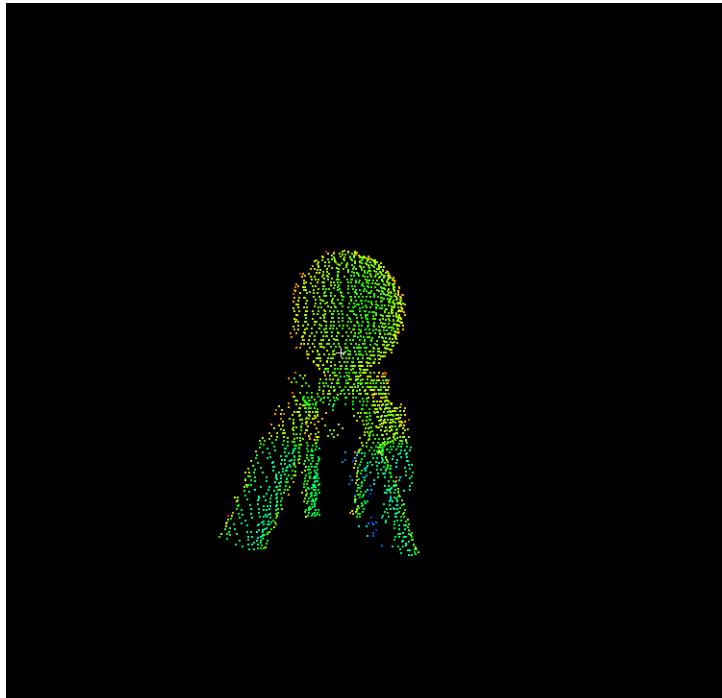
השלב הראשון בכל הטיפול במידע הוא הסריקה עצמה. מספר העמדות תלוי במורכבות המבנה והסצנה, כאשר ענן הנקודות המתקבל מכל עמדה נרכש במערכת ספרית (פולארית) מקומית. ראשית הצירים ואוריינטציית המערכת נקבעים על ידי מיקום והטיית חישן הלייזר (רי איור 6-1).



איור 6-1 ענני הנקודות מכל סריקה במערכת מקומית שונה. למעלה: החזית המערבית של הבניין מלפנים (ימין) ומהצד (שמאל); למטה: החזית הדרומית של הבניין מלפנים (ימין) ומהצד (שמאל)

6.2 עיגון

כיוון שכיסוי מבנה דורש לרוב סריקה מעמדות שונות, יש צורך לעגן את ענני הנקודות אל מערכת יחוס אחת. כיוון שכל ענן נקודות הנרכש על ידי המערכת נקלט במערכת מקומית שראשית הצירים שלה מצויה בעמדת הסורק, ענני הנקודות הנקלטים בכל סריקה מתקבלים במערכות ייחוס מקומיות שאינן קשורות זו לזו. תהליך העיגון (ר' סעיף 3.1.2 ו-4.4.2) נועד להמיר את הסריקות מכל העמדות אל מערכת ייחוס אחת. סקר הספרות מתאר שיטות שונות, חלקן יעילות יותר וחלקן פחות, לביצוע התהליך. על מנת להקל על ביצועו, נשתלו בתוך הסצנה ספירות (spheres) אשר נסרקו בצפיפות גבוהה מאוד. נבחרו ספירות משתי סיבות: קל מאוד לזהותן בענן הנקודות (ר' איור 6-2); ומכל כיוון סריקה, מרכז הספירה יהיה תמיד אותו מרכז. לכן, מרכז הספירה מהווה נקודה משותפת בין הסריקות.



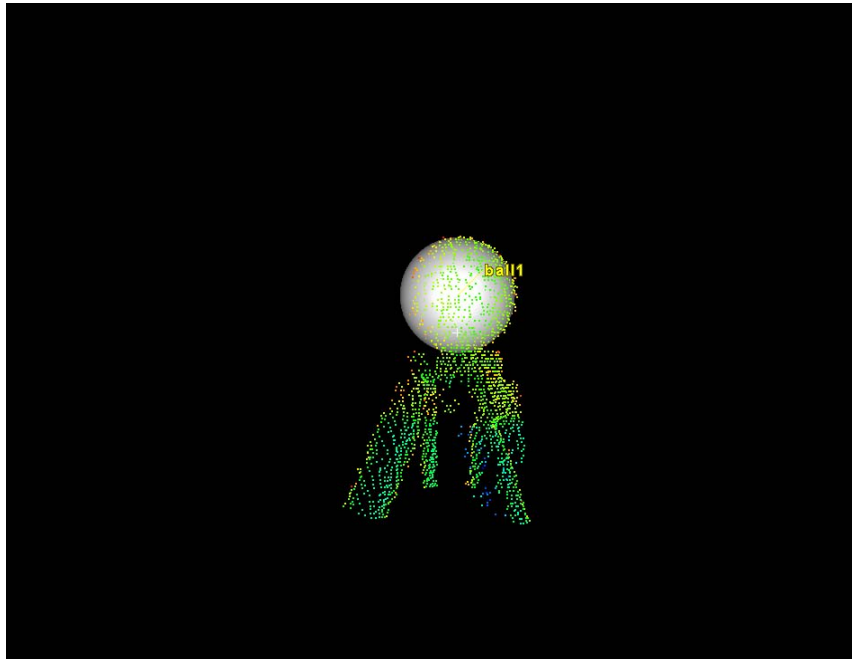
איור 6-2 ספירה על חצובה סרוקה ברזולוציה גבוהה

בין כל שתי סריקות נשתלו שלוש ספירות כך שיהיה מידע מספק לחישוב ההתמרה בין הסריקות. התמרה זו הינה התמרת גוף קשיח, המורכבת מסיבוב והזזה, והיא מהווה בעיה פתירה לינארית המתוארת על ידי:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} + t \quad (1)$$

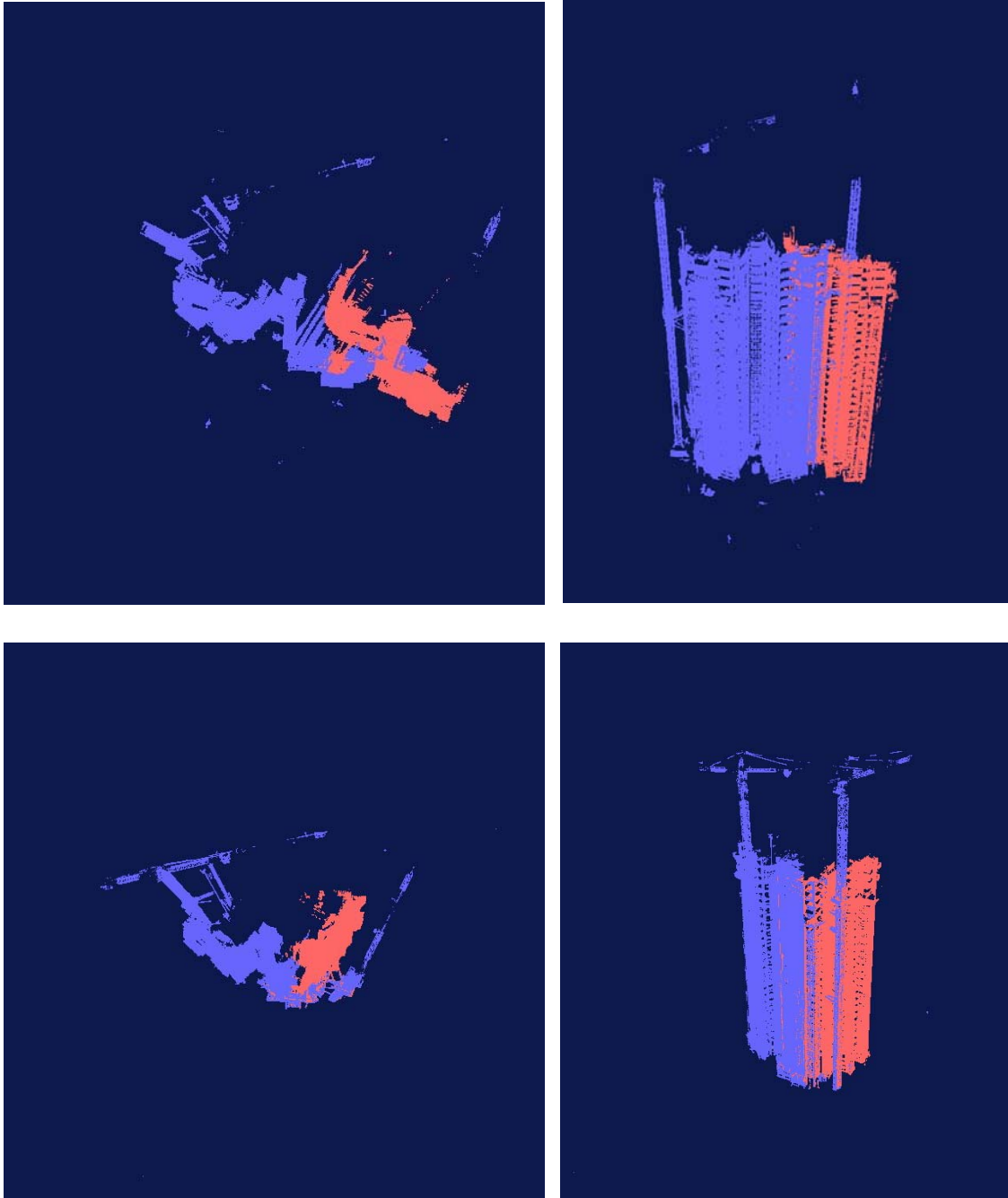
כאשר R – מטריצת הסיבוב המכילה שלושה נעלמים (זווית סיבוב סביב כל ציר), ו- t – וקטור הזזה בכל ציר בין שתי המערכות המכיל שלושה נעלמים. R ו- t מתארים, למעשה, את השוני היחסי של סורק אחד מהסורק השני במיקום ובאוריינטציה.

על מנת לחשב את ההתמרה נדרשים לפחות שישה אילוצים מרחביים לעיגון הסריקה. כל נקודה משותפת מייצרת שלוש משוואות שונות עם אותם נעלמים ולפיכך שלוש נקודות תייצרנה תשעה אילוצים הגוזרים שלוש דרגות חופש. הנקודות המשותפות בין הסריקות השונות מתקבלות מתאום כל הנקודות מענן הנקודות המתארות ספירה (כל אחת בנפרד) לכדי משוואה של ספירה, ומציאת מרכזה בכל סריקה (ר' איור 6-3).



איור 6-3 מציאת הספירה מתוך הנקודות הרלוונטיות

מציאת פרמטרי ההתמרה מאפשרת התמרת כל הנקודות מענן נקודות אחד אל מערכת הייחוס של ענן הנקודות השני. בכך, מתקבל ענן נקודות המשלב נקודות משתי סריקות שונות במערכת ייחוס אחת (ר' איור 6-4).



איור 6-4 תוצאות העיגון. למעלה: מבט מלפנים (ימין) ומלמעלה (שמאל) על שתי סריקות שבוצעו משתי עמדות שונות לפני העיגון; למטה: מבט מלפנים (ימין) ומלמעלה (שמאל) על שתי סריקות שבוצעו משתי עמדות שונות אחרי העיגון

6.3 מידול שדה הראייה של העגורנאי

בעוד שניתוח ההנפות העיוורות באופנים הקונוונציונאליים דורש תצפיות חוזרות ונשנות, והגדרת שדה הראייה של העגורנאי דורש בחינה איכותית (וויזואלית) מתוך תא העבודה, שימוש בסריקות הלייזר המספקות תיאור תלת-ממדי מלא של אתר הבנייה (כולל העגורן עצמו) מאפשר מידול זה באופן ישיר. שימוש בסריקות הלייזר מאפשר מידול מעטפת העבודה, סיווג המודל לאזורים נראים ונסתרים, וכימות האזורים לניתוח אופי העבודה בשטח מת לאורך זמן טיפוסי ובהנפות מסוימות.

עם זאת, עיבוד ענן הנקודות הינו תהליך מורכב בשל אופי ענן הנקודות. ענן הנקודות הינו אסופה של נקודות במרחב המתקבלות מנקודת המבט של הסורק. ענן הנקודות אינו מהווה תיאור של אופי המוצק של המבנה, ולא מגדיר אזורים סגורים או אטומים (כגון קירות, עמודים, וכד'). עולה צורך בתרגום ענן הנקודות השייכות לבניין לכדי גוף קשיח (ר' איור 5-6). בשל אופי המידע התלת-ממדי של הענן קיים גם קושי בהגדרת פנים וחוף או בקביעת הדרך לפיה הנקודות אמורות להיקשר זו לזו (ר' איור 6-6). ענן הנקודות במרחב הינו חסר אלמנט של קישוריות ולא ניתן לדעת יחסים של שכנות בין הנקודות. בעיה נוספת היא הצפיפות המשתנה של הענן כפונקציה של טווח האובייקט מהסורק ואופי המשטח הנסרק, לדוגמה אופקי מול אנכי (ר' איור 7-6). בעיה נוספת בהגדרת הקישוריות מתייחסת אל הסתרות (איור 8-6) אשר יוצרות אזורים נטולי מידע בתוך הענן, שעל מודל הקישוריות לגשר עליהן. על מודל העיבוד להציע בנוסף יעילות חישובית, נוחות לעבודה, ופתרון כוללני. המטרה הינה לגזור מתוך ענן הנקודות מודל המתאר נראות/נסתרות של מרחב העבודה כתלות בנקודת המבט של העגורנאי.

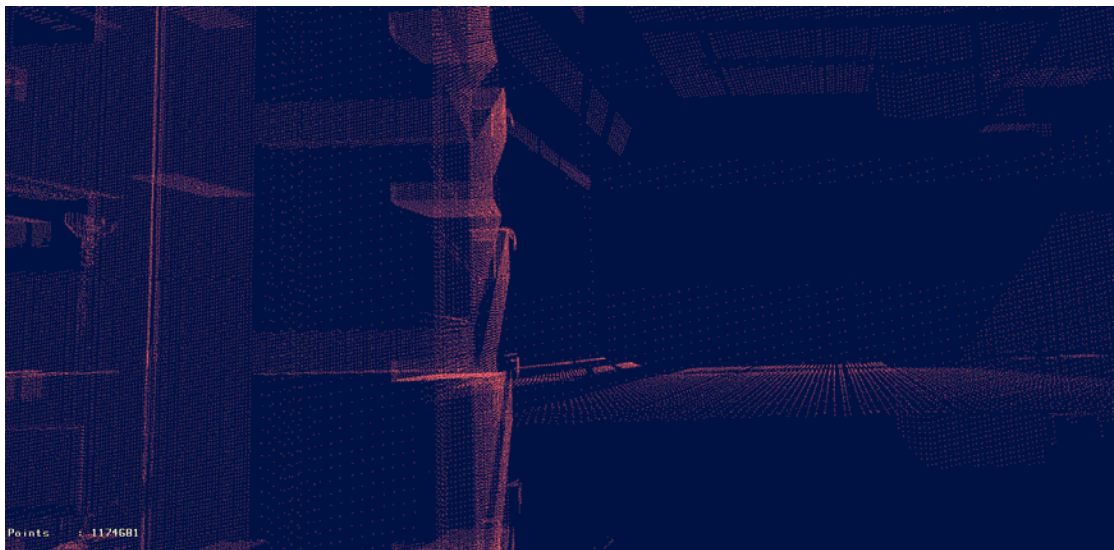
על מנת להתגבר על מורכבות זו מציע המחקר שתי חלופות.

- מידול גיאומטרי באופיו – הפשטה של מודל הבניין לצורך ייצוגו כגוף קשיח על מנת לאפשר חלוקת המרחב לאזורים נראים/נסתרים המספקת יעילות חישובית גבוהה.
- מידול שדה הראייה של העגורנאי מתוך ענן הנקודות.

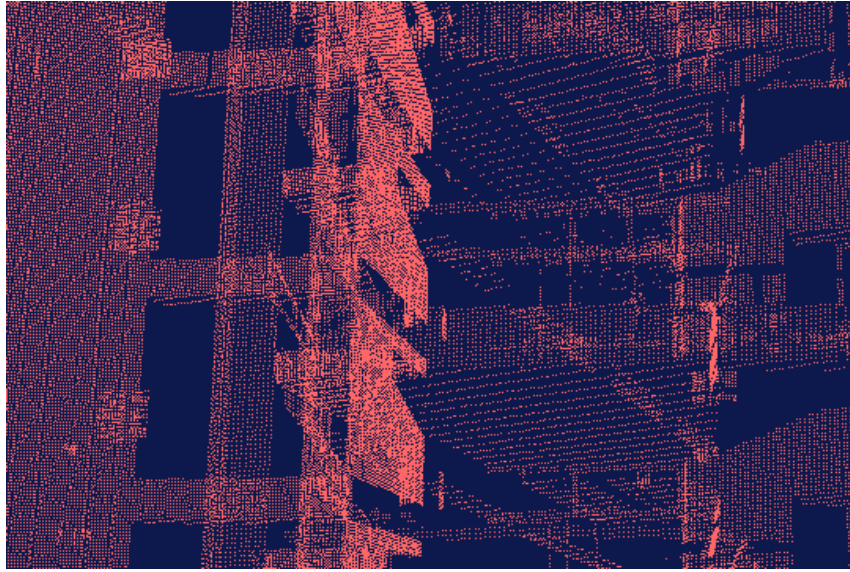
שני המודלים מספקים אמצעים משלימים לצורך עיבוד המידע, כאשר הראשון מספק תמונה כוללת של שדה הראייה, בעוד שהשני מאפשר תחקור משימות פרטניות. מודלים אלו מתוארים בסעיפים הבאים:



איור 5-6 ענן הנקודות המתקבל מחזית אחת של הבניין. מורכבות הסצנה (צורת הבניין וקבלת נקודות בתוך הבניין, על פי מה שנראה מנקודת הסריקה) מהווה קושי לייצוג הבניין כגוף קשיח



איור 6-6 תקריב על ענן הנקודות. נקודות הנמצאות על מעטפת הבניין ובתוכו



איור 6-7 תקריב על ענן הנקודות. צפיפות משתנה בציר האנכי (על הקירות) לעומת הציר האופקי (רצפת כל קומה)



איור 6-8 הסתרות בענן הנקודות הנגרמות מחסימת קו הראייה בין הסורק לאובייקט על ידי מכשולים הקיימים בשטח (כגון מרפסות והעגורן עצמו)

6.3.1 פתרון גיאומטרי

הפתרון הגיאומטרי מהווה הפשטה של סצנה מורכבת לתיאור מרחבי/אנליטי לצורך סיווג המרחב לאזורים נראים ונסתרים מנקודת מבט העגורנאי. ההפשטה מתבססת על ייצוג הבניין כגוף קשיח ובעזרתו חלוקה וייצוג מרחב העבודה של העגורן לכדי אזורים נראים או נסתרים. לצורך ביצוע ההפשטה הונחו שתי הנחות יסוד המאפיינות אתרי בנייה:

1. החתימה הקרקעית של הבניין מאפיינת את צורתו לכל אורכו, ובבניין בעל מפלסים שונים החתימה הקרקעית של כל מפלס מאפיינת את צורת אותו מפלס לכל אורכו.

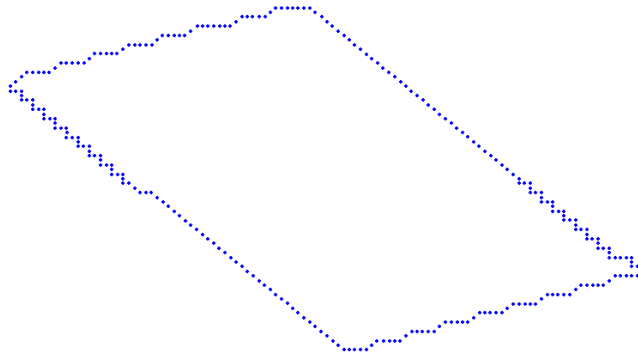
2. בניין נבנה בניצב לקרקע.

על בסיס הנחות אלו מוצע מודל המתבסס על הטלת ענן הנקודות על מישור XY וניתוח אוטונומי של הטלה זו לצורך חישוב מעטפת הבניין (או המפלס). לזיהוי מעטפת הבניין מוצע שימוש בהתמרת Hough, אלגוריתם לזיהוי תבניות המאפשר זיהוי וניתוח קווים בתוך סט נתונים לא סדור שבו מספר הקווים ומגמתם אינם ידועים

6.3.1.1 חילוץ קווים ישרים בעזרת התמרת Hough

החתימה הקרקעית של הבניין אותרה תוך שימוש בהתמרת Hough, שנועדה בבסיסה לזהות קווים ישרים בתוך סטי נקודות. להלן הסבר על השיטה:

רוב המבנים הם בעלי צורה הנדסית פשוטה שניתן להגדירה ע"י מספר סופי של קווים ישרים. בהינתן אוסף הנקודות הנופלות על שפת הבניין ובקרבנותו ניתן להעביר בין קווים כמו גם להגדיר את פינות המבנה על ידי מציאת נקודות החיתוך בין קווים אלו. איור 6-9 מתאר את נקודות השפה שחולצו, ניתן לראות שנקודות השפה של המבנה מקבלות באופן כללי צורה דומה לצורתו של המבנה המקורי, אולם מקרוב הם נראים כזיגזג. חילוץ קווי המבנה מסתמך על התמרת Hough. זיהוי הקווים מתבצע באופן סדרתי ע"י מציאת השיא המקסימאלי, ועיבוד הנתונים המתייחס לשיא זה. כעקרון, פרמטרי הקו נגזרים מתוך טרנספורמציה Hough, כאשר מציאת הקו עצמו מתבצעת בעזרת תיאום של כל הנקודות הקרובות לקו עד כדי מרחק מוגדר מראש. כל הנקודות הקרובות לקו מסולקות ממאגר הנקודות, וכל התהליך מתבצע שוב על הנקודות שנותרו. בכל איטרציה מחולץ קו בודד ומספר השיאים הולך וקטן, כמו גם מספר הנקודות במאגר. בסוף התהליך מתקבלת רשימת קווים ישרים שיש לבצע חיתוך בניהם ולחלץ את פינות המבנה.



איור 9-6 גבולות המבנה לאחר זיהוי הספים

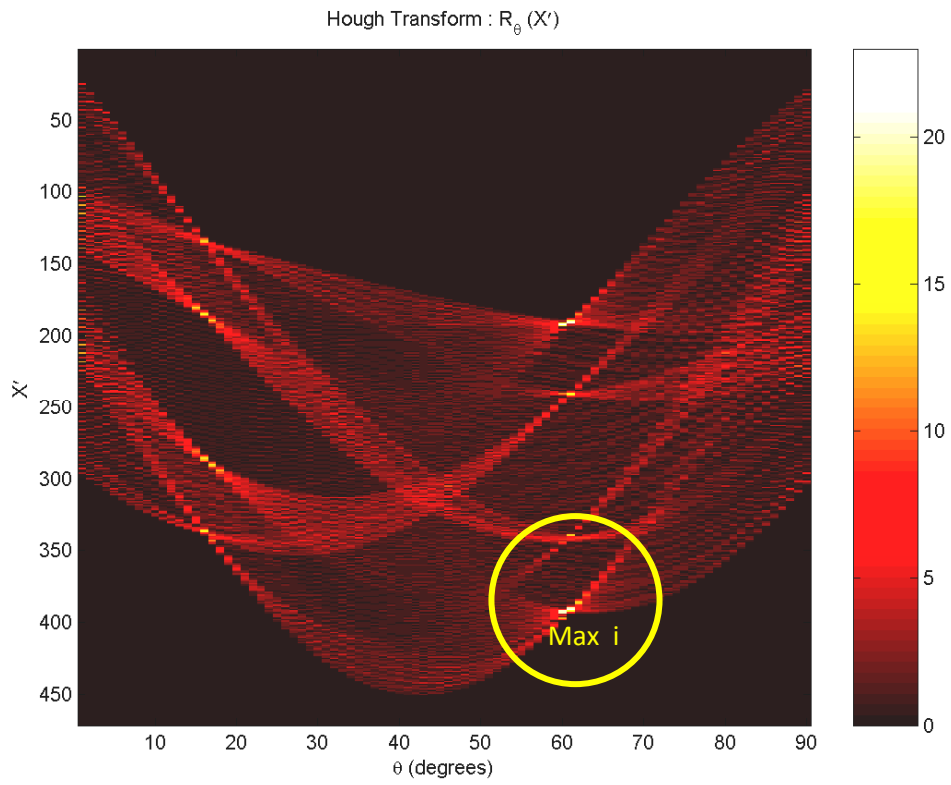
הדרך בה עובדת טכניקת התמרת Hough למציאת קווים ישרים בפרט או כל צורה גיאומטרית שניתן לתארה ע"י משוואה מתמטית היא להעביר את כל הנקודות למישור או מרחב שציריו הן פרמטרי המשוואה המייצגת את הקו. במקרה הנוכחי זהו קו ישר הניתן לתיאור בייצוג קרטזי

$$y = ax + b \quad (2)$$

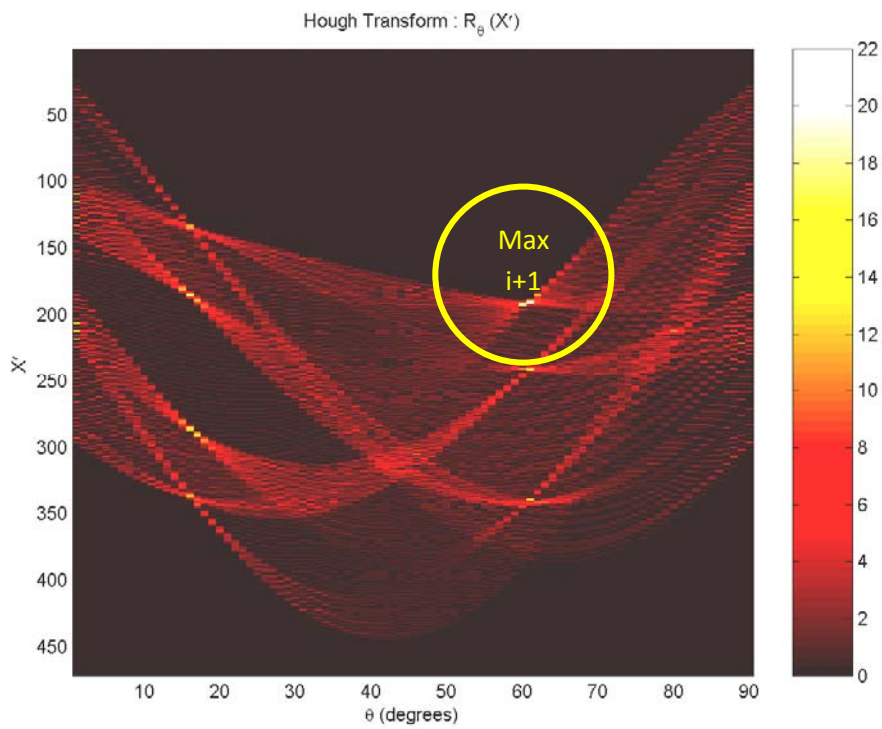
כאשר a, b הם פרמטרי הקו (שיפוע וקבוע), או בייצוג פולארי

$$\rho = y \cos \varphi + x \sin \varphi \quad (3)$$

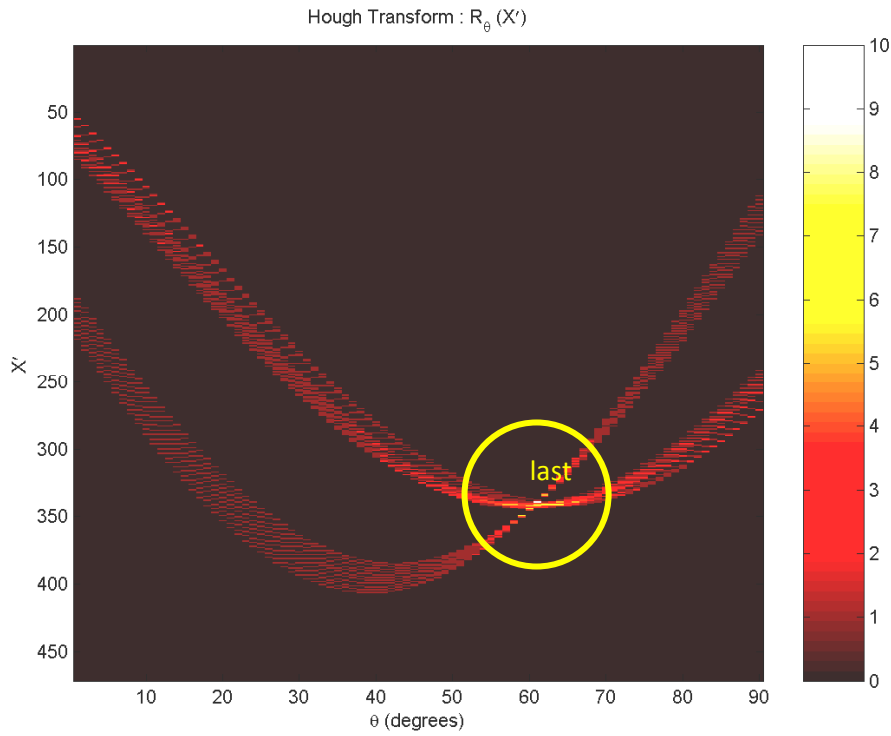
כאשר, φ ו- ρ מייצגים את שיפוע הקו ומרחקו מהראשית, בהתאמה (ר' איור 10-6) כל נקודות השפה מועברות טרנספורמציה כאשר הזווית והמרחק משתנים במרווחים קבועים. בתום הטרנספורמציה מתקבלת מטריצה דו ממדית שבה כל הנקודות שנופלות על אותו קו יגדירו שיא חזק (ר' איור 10-6) מספר השיאים הוא כמספר הקווים הנמצאים, עוצמת השיא היא כמספר הנקודות שנופלות על קו זה. לשם מציאת הקו הראשון נמצא את הערך המקסימאלי במטריצה ואת הפרמטרים שלו, לאחר חילוץ משוואת הקו הראשון ומציאת הנקודות הנמצאות בקרבתו במרחק המתאים לנתוני הסריקה, תסולקנה נקודות אלו ממאגר הנקודות הראשי ועל המאגר הראשי יבוצע עוד פעם תהליך מציאת קו ישר חדש המתחיל מטרנספורמציה Hough והפעם יופיעו אותם שיאים ללא הקו הראשון שחולץ (ר' איור 11-6), מציאת הקו השני תהיי בעזרת מציאת מקסימה גלובלית וההמשך זהה למה שהוסבר לעיל. לשם מציאת משוואת הקו יעשה שימוש בתהליך תיאום רגיל על הנקודות המסולקות בכל שלב.



איור 6-10 שיאים חזקים – איתור שיא ראשון. ציר X מייצג את הזווית ϕ וציר ρ מייצג את המרחק ρ



איור 6-11 שיאים חזקים – איתור שיא שני

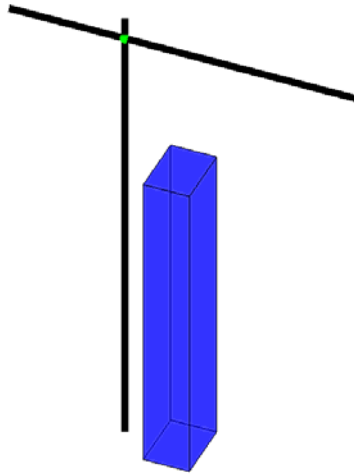


איור 6-12 שיאים חזקים – איתור שיא אחרון

בשלב האחרון נותר קו בודד (שיא אחד ר' איור 6-12) חזק שלאחר סילוקו יופיעו נקודות שיא, אם בכלל, בעוצמה קטנה מערך מוכתב מראש, והתהליך יפסק. בתום שלב זה יתקבלו מספר קווים שחולצו בעזרת פרמטי Hough וממול מספר זהה של אותם קווים המחולץ בעזרת תיאום. נקודות הפינה של המבנה יחולצו בעזרת החיתוך בין הקווים.

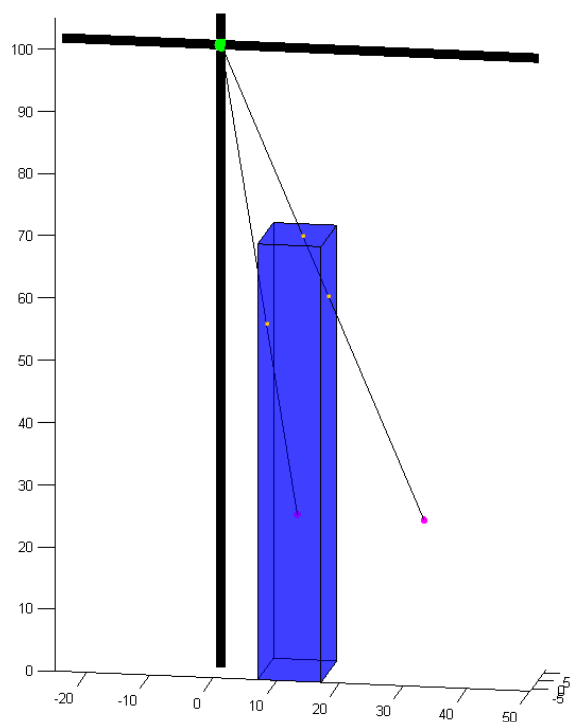
6.3.1.2 ייצוג המרחב וסיווג

מציאת החתימה הקרקעית של הבניין מאפשרת הגדרת הבניין כגוף קשיח במרחב כתלות בגובה הקומה הנוכחית ובעזרת הנחות היסוד שהוגדרו בסעיף 6.3.1. גם את נקודת המבט של העגורנאי ניתן להגדיר באופן ישיר בהינתן גובה עגורן ברגע מסוים ומיקום מרכזו (ר' איור 6-13).

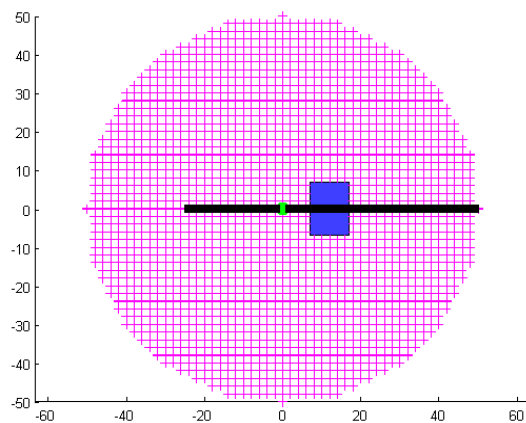


איור 6-13 מידול הבניין לפי חתימתו הקרקעית ומידול העגורן לפי מיקום מרכזו וגובהו

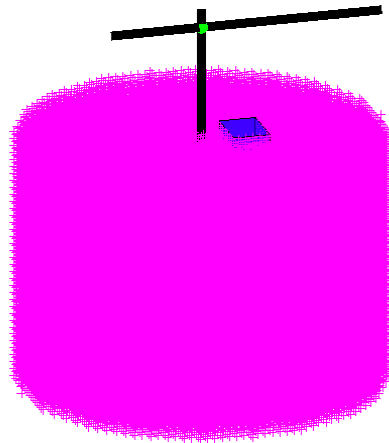
חלוקת המרחב לאזורים נראים ונסתרים בצורה נפחית נבחר ייצוג מבוסס ווקסלים (קוביות תלת-ממדיות, voxels-volumetric pixels), מונח המקביל לפיקסל כאשר מדובר במרחב תלת-ממדי, לחלוקת המרחב. כל מרכז ווקסל נבדק האם הוא נמצא בקו ראייה ישיר מתא העגורנאי או שקיימת הפרעה (בצורת הבניין) בקו הראייה. בדיקת קו הראייה נעשית בעבור כל ווקסל אל מול כל אחד מהמשטחים המגדירים את הבניין, כלומר אל מול קירות הבניין ואל מול גג הבניין. על מנת להימנע מסיווג ווקסלים הנמצאים בתוך הבניין (ווקסלים נסתרים תמיד ולכן אינם שייכים למרחב העבודה) יש לבדוק את מספר החיתוכים של קו הראייה עם משטחי הבניין. אם מספר החיתוכים זוגי, אותו ווקסל יסווג כנסתר. אם מספר החיתוכים אי-זוגי, הווקסל יסווג כנמצא בתוך הבניין (ר' איור 6-14). בדיקה זו תקפה לכל צורה שאינה חותכת את עצמה. לצורך המחקר נעשה שימוש בהנחות היסוד על מנת לפשט את תהליך סיווג הווקסלים לפנים וחוץ. ההפשטה נעשתה על ידי הטלת כל ווקסל על מישור XY ובדיקה האם הוא נמצא בתוך הפוליגון המגדיר את החתימה הקרקעית של הבניין. ווקסלים הנמצאים בתוך הפוליגון מוגדרים ווקסלים פנימיים וווקסלים הנמצאים מחוץ לפוליגון מוגדרים ווקסלים חיצוניים, אותם יש לסווג לנראים או נסתרים. הפשטה נוספת שנעשתה לייעול תהליך הסיווג לווקסלים נראים/נסתרים הינה בדיקת רק ווקסלים כאלו אשר מרכזם חסום בצדדים על ידי מעטפת העבודה של העגורן (ווקסלים אשר מגדירים מיקום בו וו העגורן יכול להימצא פיזית) (ר' איור 6-15), מלמטה על ידי הקרקע, ומלמעלה על ידי הגובה הנוכחי של הבניין (ר' איור 6-16).



איור 6-14 סיווג ווקסלים על פי מספר החיתוכים עם מישורי הבניין



איור 6-15 מרחב העבודה ממבט על. הווקסלים הנבחרים בתוך מעטפת העבודה של העגורן



איור 6-16 מרחב העבודה ממבט צד. הווקסלים הנבחרים חסומים בין הקרקע לגובה הבניין ובתוך מעטפת העבודה של העגורן

מיון הווקסלים ל"נראים" או "נסתרים" נעשה בשני שלבים. שלב ראשון – הגדרת המשטחים המרכיבים את הבניין. שלב שני – בדיקת חיתוך בין קו הראייה המוגדר על ידי נקודת מרכז הווקסל ונקודת המבט של העגורנאי לבין כל אחת ממשטחי הבניין.

הגדרת משטחי הבניין:

כל המשטחים הם מישורים הניצבים לקרקע (מישור XY). על מנת לבדוק חיתוך בין קו הראייה לבין כל אחד מהמישורים נבחר ייצוג של מישור בעזרת נורמל ונקודה על המישור. כיוון שהמישור ניצב לקרקע ערך Z של הנורמל יהיה 0 (מקביל למישור XY), ומשוואת הנורמל תהיה:

$$n = \left[-(P_{2y} \cdot P_{1y}), (P_{2x} \cdot P_{1x}), 0 \right] \quad (4)$$

כאשר P_1 ו- P_2 הן שתי נקודות עוקבות מתוך אוסף הנקודות המגדיר את החתימה הקרקעית של הבניין. בעזרת הנורמל ונקודה על המישור (למשל אחת משתי הנקודות) ניתן להגדיר את משוואת המישור.

בדיקת חיתוך בין קו הראייה לכל אחת ממשטחי הבניין:

נקודת המבט של העגורנאי ונקודת מרכז הווקסל מגדירות את קו הראייה.

משוואת קו במרחב מוגדרת על ידי

$$I = C + \lambda \cdot v \quad (5)$$

כאשר C – נקודת המוצא של הקו (במקרה שלנו C היא נקודת המבט של העגורנאי), λ – כופל כלשהו המגדיר תנועה על הקו, v – ווקטור המגדיר את כיוון ההסתכלות (לכיוון מרכז הווקסל הנבדק), ו- I – נקודה על הקו.

מתוך חישובי העזר:

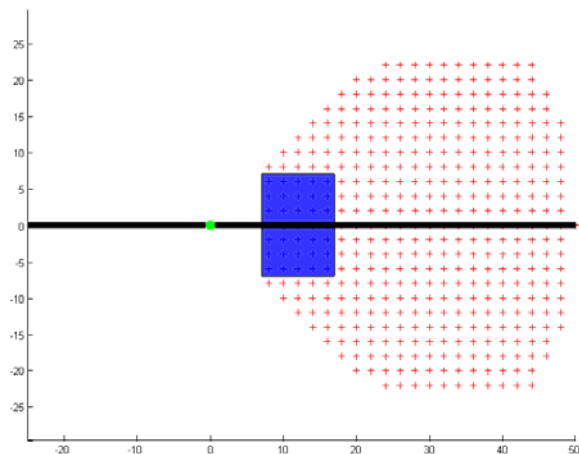
$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= V - C \\ \mathbf{w} &= C - P_1 \\ d &= \langle \mathbf{n}, \mathbf{u} \rangle \\ N &= -\langle \mathbf{n}, \mathbf{w} \rangle \\ t &= N / d \end{aligned} \quad (6)$$

כאשר C – נקודת המבט של העגורנאי, V – נקודת מרכז הווקסל, P_1 – נקודה על המישור (אחת משתי הנקודות מתוך החתימה הקרקעית שבעזרתן הוגדר הנורמל), ו- n – הנורמל של המישור. מכאן שנקודת החיתוך (I_p) של קו הראייה עם המישור הנבדק הינה:

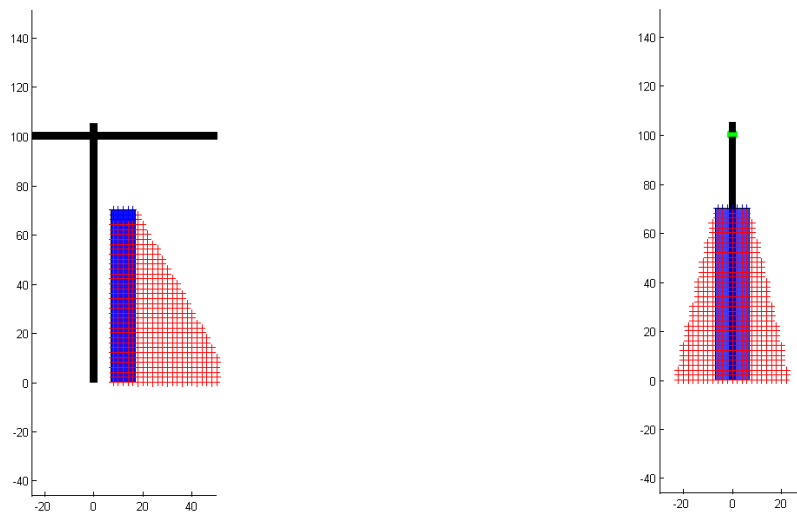
$$I_p = C + t \cdot \mathbf{u} \quad (7)$$

יש צורך לבדוק שהמרחק בין נקודת המבט של העגורנאי לנקודה I_p קטן מהמרחק בין נקודת המבט של העגורנאי למרכז הווקסל הנבדק. אם תנאי זה אינו מתקיים, משמע הווקסל הנבדק נמצא בין נקודת המבט של העגורנאי לבין הבניין ולכן יש לסווג ווקסל זה כ"נראה". אם התנאי מתקיים יש לבדוק האם נקודת החיתוך נמצאת בתוך גבולות המישור הפיזי של קיר הבניין, שכן מישור החיתוך הוגדר בעזרת נורמל ונקודה על המישור, ובהגדרתו נפרס על המרחב כולו. אם נקודת החיתוך נמצאת בתחום, חלק המישור הרלוונטי נמצא בין אותו ווקסל לבין נקודת המבט של העגורן ולכן הווקסל הנבדק מסווג כ"נסתר". אם נקודת החיתוך נמצאת מחוץ לאותה מסגרת, חלק המישור הרלוונטי אינו מסתיר את מרכז הווקסל מנקודת המבט של העגורנאי.

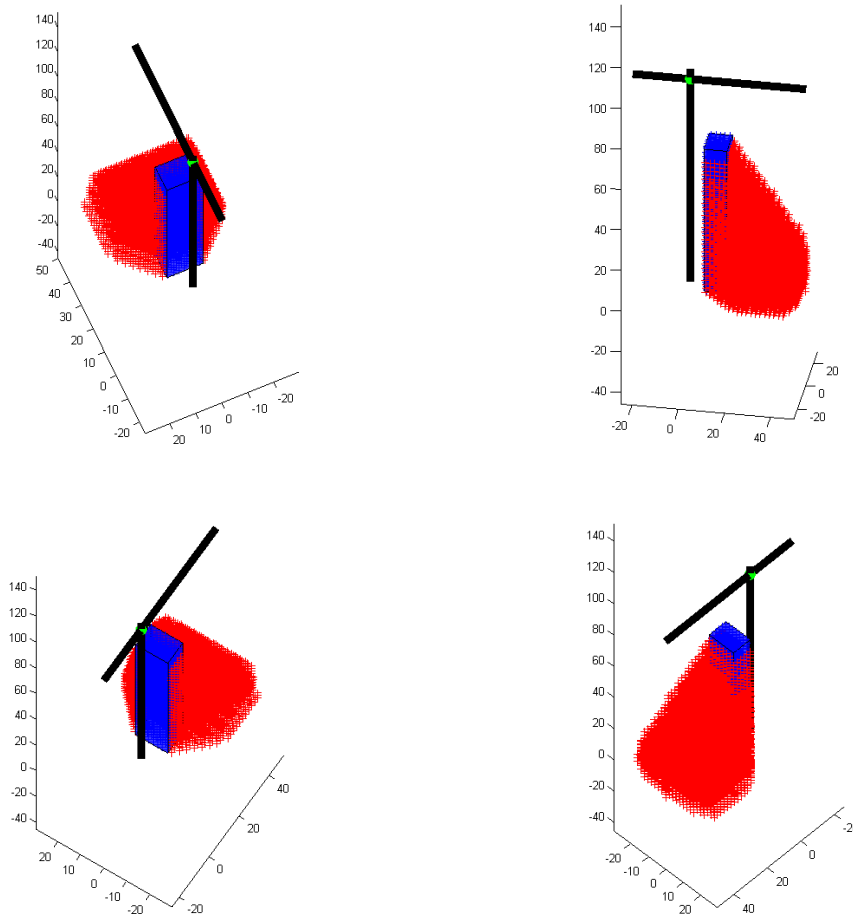
איורים 6-17 עד 6-19 מראים את תהליך מציאת האזורים המתים מתוך דוגמה סינטטית של בניין מרובע בגובה 70 מ' ועגורן בגובה 100 מ'. צבע כחול – הבניין, שחור – עגורן, נקודה ירוקה – נקודת המבט של העגורנאי, נקודות אדומות – ווקסלים שסווגו כ"נסתרים".



איור 6-17 אזורים נראים ונסתרים – מבט על



איור 6-18 אזורים נראים ונסתרים – מימין: מבט קדמי; משמאל: מבט צד



איור 6-19 אזורים נראים ונסתרים – מבטים שונים

6.3.2 זיהוי אזורים בלתי נראים על בסיס מידול שדה הראייה של העגורנאי

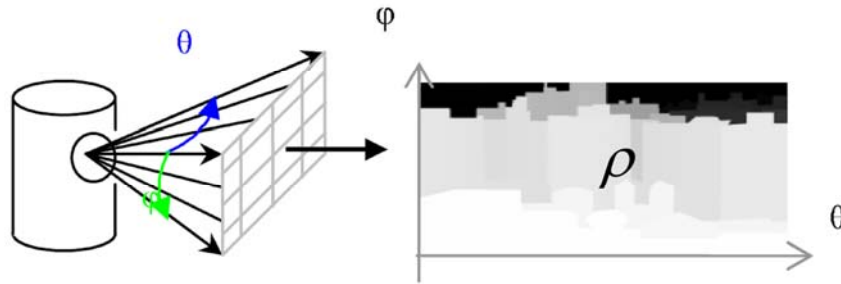
הניתוח שהוצג מאפשר חישוב מכלול השטחים הנסתרים מתא העגורנאי, בהתאם להתקדמות הבנייה. המודל הנוכחי מתאר פתרון שפותח לצורך תחקור מסלול הנפה בודד. תרומתו היא בפשטות החישוב הנדרש לצורך שאילתה מעיין זו. ביסודו מבוסס מודל חישובי זה על ייצוג נתוני הסריקה על ידי פנוראמת טווחים.

6.3.2.1 הייצוג הפנוראמי

סריקות הלייזר התלת-ממדיות ניתנות לתיאור על-ידי רשת פולארית שציריה הם זוויות הסריקה האנכיות והאופקיות של המערכת וערכיה הם הטווחים הנמדדים. מכיוון שהמרווחים הזוויתיים קבועים ומוגדרים על ידי המערכת, מתקבל בייצוג הפולארי רשת סדורה המייצגת את ענן הנקודות הלא סדור בייצוג הקרטזי. הקשר בין הייצוג הקרטזי והפולארי של הנתונים נתון במשוואה:

$$(x, y, z)^T = \rho(\cos \phi \cos \theta, \cos \phi \sin \theta, \sin \phi)^T \quad (8)$$

כאשר, x, y, z הן הקואורדינטות הקרטזיות של הנקודה, ϕ, θ הן הקואורדינטות הפולאריות של קרן הלייזר (זווית אנכית ואופקית בהתאמה) ו- ρ הוא הטווח המדוד. בייצוג זה ϕ, θ הם המרווחים הזוויתיים הקבועים אשר קובעים את הרזולוציה ואת גודל הפיקסל בתמונה הפנוראמית הנוצרת. איור 6-20 מציג את תמונת הפנוראמה הנוצרת מייצוג הסריקה כרשת פולארית כאשר הציר האופקי מייצג את הזווית האופקית θ הנעה בין $(0, 2\pi]$ והציר האנכי מייצג את הזווית האנכית ϕ הנעה בין $[-\pi/4, \pi/4]$. ארגון ענן הנקודות התלת-ממדי ברשת פולארית סדורה מאפשר ייצוג נוח יותר, וגם מסדר את הנתונים לפי סדר וכיוון סריקתם. סידור הנקודות לפי כיוון מאפשר הגדרת שכנות וקישוריות בצורה טבעית, פשוטה ונוחה.



איור 6-20 סידור ענן נקודות תלת-ממדי כתמונת טווחים פנוראמית

את הסריקה (ענן הנקודות) ניתן להתמיר אל מערכת מקומית אחרת. התמרה זו מאפשרת לבחון את הסריקה, שהתבצעה מעמדה אחת, כאילו היא התבצעה מעמדה אחרת (רי איור 6-21). התמרה זו ניתנת לחישוב על בסיס פרמטרי האוריינטציה בין הסורק מהסריקה שהתקיימה (מיקום וזוויות הרכנה) אל המיקום החדש שיתאר מיקום וירטואלי של סורק. זוהי התמרה של גוף קשיח, (רי נוסחה 1)



איור 6-21 סריקה בייצוג פנוראמי. מימין: תמונה פנוראמית של הבניין מנקודת המבט של הסורק; משמאל: תמונה פנוראמית של הבניין מנקודת מבט וירטואלית (מעל גובה הקרקע)

6.3.2.2 סיווג נקודות כנראות/נסתרות

ניתן ליצור תמונת פנוראמה מנקודת המבט של העגורנאי. בצורה הזו תתקבל תמונת טווחים הדומה למבט העגורנאי. את מיקום וו העגורן, המתקבל בצורה קרטזית, ניתן להפוך למידע פולארי בעזרת ההתמרה ההפוכה, לפי הנוסחה:

$$(\theta, \varphi, \rho)^T = (\text{atan2}(y,x), \text{atan2}(z, \sqrt{x^2 + y^2}), \sqrt{x^2 + y^2 + z^2})^T \quad (9)$$

מתוך הקואורדינטות הפולאריות ניתן לקשר את מיקום הו לפיקסל המתייחס למיקום הו מנקודת המבט של העגורנאי בתמונת הפנוראמה. לאחר התמרת הסריקה למיקום נקודת המבט של העגורנאי, ההשוואה בין הסריקה המותמרת לנתוני מיקום הו ניתנת למימוש כפעולת החסרה פשוטה. בפעולה זו מחסירים את הטווח לנקודת הו (מבוטא על ידי הפרמטר ρ) מהטווח שאכן קיים בתמונת הפנוראמה שהותמרה לנקודת המבט של העגורנאי במיקום (φ, θ) (זהו המיקום של האובייקט הראשון שנראה מנקודת המבט של העגורנאי).

למעשה, ההשוואה בין הסריקה לנקודת הו תוגדר באופן הבא:

$$d_{i,j} = \begin{cases} \text{visible} & R_{i,j} - A_{i,j} > \varepsilon \\ \text{uncertainty} & |R_{i,j} - A_{i,j}| \leq \varepsilon \\ \text{occluded} & R_{i,j} - A_{i,j} < -\varepsilon \end{cases} \quad (10)$$

כאשר, d_{ij} הוא ערך ההפרש, R_{ij} הוא ערך הטווח של הווי לו היה נסרק מנקודת המבט של העגורנאי, A_{ij} הוא ערך הטווח מהסריקה לו הייתה נסרקת מנקודת המבט של העגורנאי, ו- ε הוא ערך סף לדיוק הנדרש.

ניתן לראות שעל ידי החסרה פשוטה מתקבל בעבור כל נקודת המצאות וו העגורן האם נקודה זו היא באזור נראה או באזור נסתר מנקודת מבטו של העגורנאי. ביצוע התחקור עבור מסלול הנפה מלא יוביל לניתוח נראות ונסתרות של חלקים בו באופן מלא.

7. תוצאות ואינטגרציה

פרק זה עוסק בתיאור הפעלת המודלים שפותחו על סריקות הלייזר ושילובם עם המידע שהתקבל מהמדידות הידניות. נתוני סריקות הלייזר מאפשרים ניתוח שדה הראייה ותחקור המרחב במונחים של הפעלה בודדת. כלים מעין אלו יכולים לספק חיווי לגבי אופי תפעול ההנפות באתר הבנייה. מעבר לבחינת פעולות הכוללות תיאור פעילות העגרון לאורך תקופת עבודה טיפוסית ולאורך הנפות בודדות, מעמת המחקר ניתוחים אלו אל מול המדידות הידניות. תצפיות אלו מאפשרות קבלת מידע סמנטי, כגון מה הונף, מאיזה אזור, והאם היו בעיות מסוימות באותה הנפה, מידע שלא ניתן לקבל מסריקות הלייזר. לעומת זאת, בנוסף למידע תיאורי זה נמדדו גם זמני כל הנפה (חצי מחזור) ומתוכם זמן הימצאות וו העגרון בשטח מת, מידע כמותי המתאר את פעילות העגרון לאורך תקופת עבודה טיפוסית.

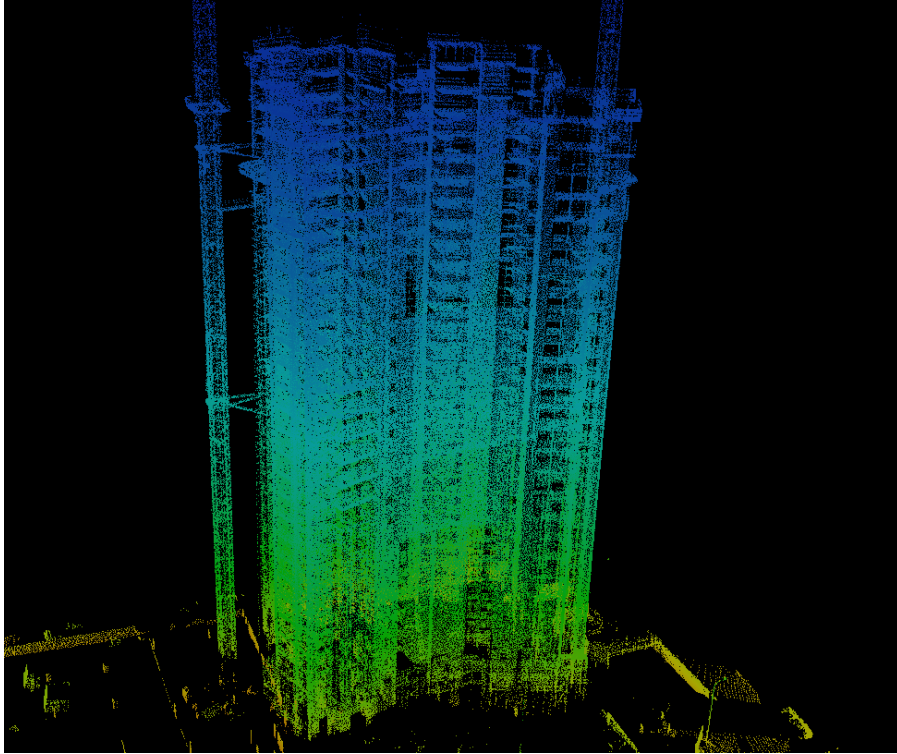
7.1 בניית מודל המתאר את אתר הבנייה

לצורך תיאור המבנה באופן מספק נסרק אתר הבנייה מארבע עמדות. סך כל המידע שנקלט כולל תשעה מיליון נקודות שמתארות את המבנה וסביבתו (כולל תיאור תלת-ממדי של העגרון עצמו, ר' איור 7.1).

תהליך עיבוד המידע כלל בשלב ראשון עיגון הסריקות לכדי מערכת ייחוס אחידה ולאחריה ארגון הנתונים ובניית המודלים לצורך תהליך השחזור.

7.1.1 עיגון

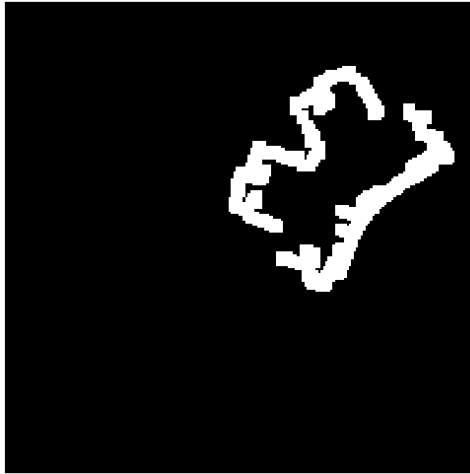
בין כל שתי עמדות נסרקו שלוש ספירות (spheres). כמות הנעלמים המתארת התמרת גוף קשיח כוללת שישה נעלמים (שלושה נעלמי מיקום ושלושה נעלמי אוריינטציה), כאשר כל נקודה תורמת שלוש משוואות. שימוש בשלוש ספירות יצר תשע משוואות ושלוש דרגות חופש למציאת הנעלמים. חישוב הנעלמים בוצע על ידי רגרסיה לינארית (תאום תשע המשוואות למציאת ששת הנעלמים). עיגון הסריקות נעשה למערכת המקומית של עמדת הסורק השנייה. ארבע הסריקות, לאחר ההתמרה למערכת ייחוס אחת, מספקות את ענן הנקודות של הבניין בשלמותו במערכת אחת (ר' איור 7-1)



איור 7-1 ענן הנקודות מארבע הסריקות לאחר העיגון

7.1.2 הטלת ענן הנקודות על מישור

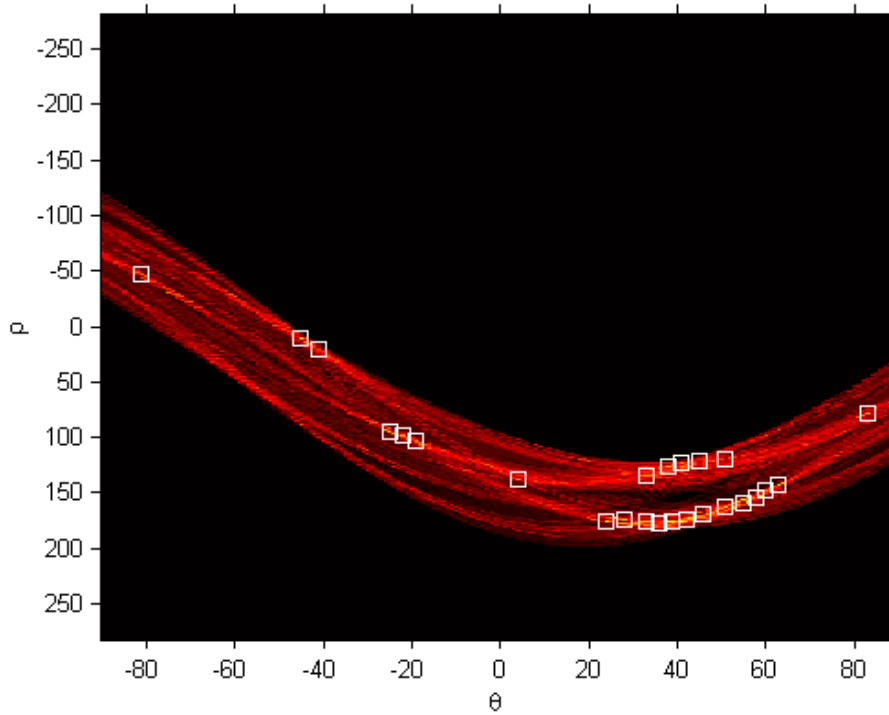
על מנת להקל על מציאת החתימה הקרקעית של הבניין, קובצו הנקודות לתאים ריבועיים (רסטריזציה), כאשר כל תא נקבע כבעל גודל צלע של 0.5 מ'. תאים המכילים פחות מאלף נקודות לתא סוננו, והוגדרו כתאים שאינם מהווים חלק מהבניין (ר' איור 7-2). ייצוג זה מתאים ויעיל להמשך העבודה.



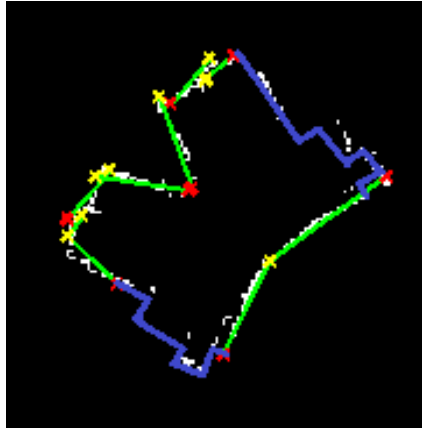
איור 7-2 הטלת ענן הנקודות על מישור XY

7.1.3 חילוץ קווי מעטפת הבניין

מעטפת הבניין נמצאה באמצעות טרנספורמצית Hough. איור 7-3 ואיור 7-4 מתארים את התוצאה:



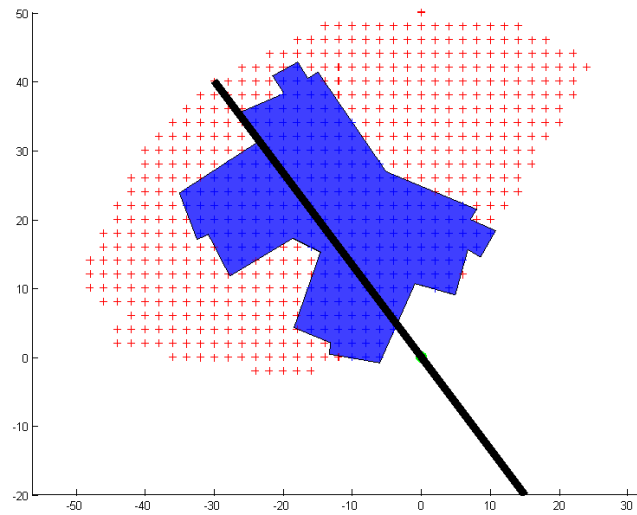
איור 7-3 השיאים שנלקחו בחשבון כקווים



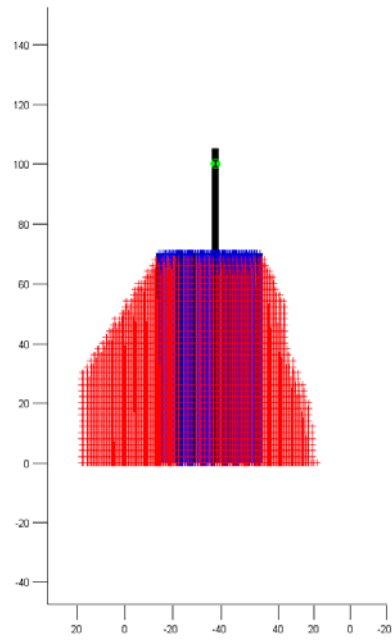
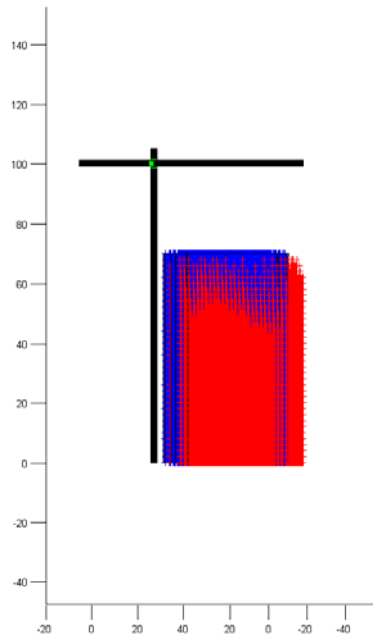
איור 7-6 השלמת קווים חסרים

7.1.4 ייצוג המרחב וסיווג

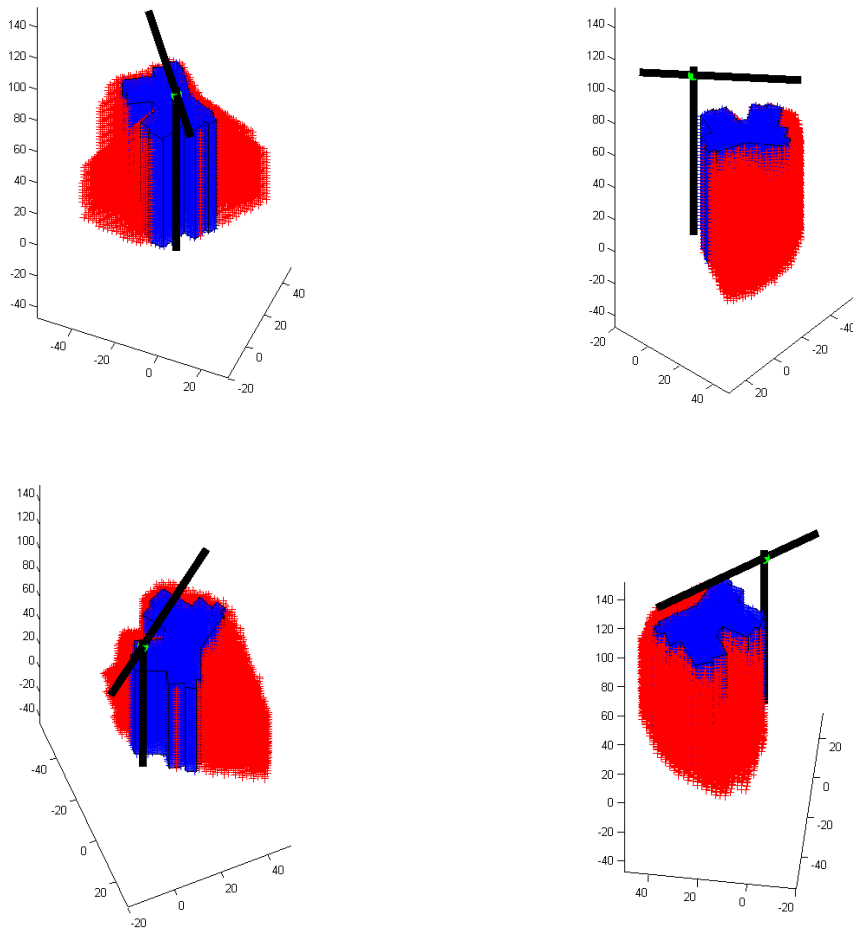
בסעיף 6.3.2 פורט על השיטה למציאת המרחב הנראה והנסתר, סיווג, וייצוג. תהליך זה בוצע על בניין המחקר והתוצאות מוצגות באיורים 7-7 עד 7-9.



איור 7-7 אזורים נראים ונסתרים – מבט על



איור 7-8 אזורים נראים ונסתרים – מימין: מבט קדמי; משמאל: מבט צד



איור 7-9 אזורים נראים ונסתרים – מבטים שונים

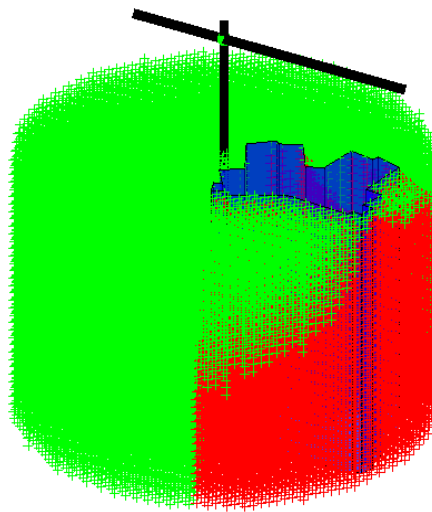
7.2 השוואה ואימות מידע המתקבל מסריקות הלייזר בעזרת המדידות הידניות

על המודל בוצעו חישובים כמותיים על סך כל הנפח הנסתר ביחס לנפח כל שטח העבודה ובנוסף נחקר החלק העיוור בהנפה בודדת (חצי מחזור). על מנת לבחון את מהימנות התוצאות המתקבלות מתוך המודל, הושאו תוצאות אלו לחישובים שנעשו בעזרת המדידות הידניות.

7.2.1 השוואת הנפח הנסתר הכולל

עיבוד כל המדידות הידניות מראה כי מתוך 201 חצאי המחזור שנצפו בסך הכול, 69 מהם עברו בשטח מת. כלומר, ב-34% מסך חצאי המחזור (בהנחה שהמדידות הידניות מהוות מדגם מייצג בעבור כלל ההנפות) יש מעבר בשטח מת. נתון זה נבחן אל מול המודל שנבנה מסריקות הלייזר על מנת לחפש התאמה מתוך הגיאומטריה של האתר בלבד. לשם כך, חולק מרחב העבודה של העגורן (כל האזור שמסביבו ברדיוס של זרועו, 50 מ') לוקסלים וכל ווקסל סווג ל"נראה" או "נסתר" (רי איור 7-10). כל הווקסלים שמעל גובה הבניין (נראים בכל עת ולכן לא רלוונטיים למחקר) ואלו

הנמצאים בתוך הבניין (ווקסלים נסתרים תמיד ולכן אינם רלוונטיים למחקר) הוסרו. בנוסף, לפי הסתכלות במפת האתר (ר' איור 1-5), נמצא כי שטח גזרה של כ-120 מעלות, הנמצא באזור הנראה (מאחורי העגורן), אינו מהווה עניין בעבור העגורן. כלומר, מתוך כל שטח העבודה שאליו העגורן יכול להגיע, נעשה בפועל שימוש רק בכשני שלישי מסך כל השטח. נמצא כי 10,737 מסך כל הווקסלים סווגו כ"נסתרים" מתוך 38,964 הווקסלים הרלוונטיים. כלומר, 27.5% משטח העבודה נמצא בשטח נסתר מתוך החישוב על המודל, לעומת 34% שהתקבל מתוך המדידות הידניות. הפרש קטן זה מראה כי ניתן במתאר העבודה הנוכחי למצוא התאמה בין תאחוז ההנפות העוררות לתאחוז השטח הנסתר באתר. מתוך הנחה כי אופי ההנפות פרוס אחיד באתר הבנייה, ניתן על סמך המודל הכמותי לאמוד את תאחוז ההנפות העוררות באתר טיפוסי מעיין זה.



איור 10-7 חלוקת המרחב לווקסלים רלוונטיים לאחר סינון אלו שמעל גובה הבניין, מחוץ לטווח של זרוע העגורן, ובתוך הבניין. ירוק: אזור נראה; אדום: אזור נסתר

7.2.2 השוואה ואימות החלק העיוור בהנפות בודדות

המודל מאפשר בחינת הנפות בודדות ותחקור המרכיב הנסתר מתוכן. מתוך המדידות הידניות ניתן לראות בכל חצי מחזור את תאחוז ההנפה העיוורת מתוך כל ההנפה (ר' נספח א'). בנוסף, בכל חצי מחזור מתואר מהיכן ולאן הונף המטען. מתוך המודל שנבנה מסריקות הלייזר ניתן להשוות תאחוז זה (המחושב מזמנים) לתאחוז דומה המחושב ממרחק תנועה בשטח נראה ומרחק תנועה בשטח נסתר. בהנחה שמהירות העגורן קבועה, צפויים להתקבל תאחוזים דומים. על מנת לבחון ולאמת את התוצאות המתקבלות מהמודל עם המדידות הידניות, נבחר יום בו היו כמה מדידות מאותו אזור בקרקע לאזור בבניין (באותה קומה) ונחשב בעבור מקרה זה את החלק הנסתר מתוך המודל ומתוך אותן מדידות ידניות.

לצורך המחשת התהליך נלקחו לדוגמה המדידות הידניות שהתבצעו ב-31.8.10 בבוקר. ביום זה העגורן היה בגובה 100 מ' והבניין היה בגובה 69 מ' (20 קומות מגורים טיפוסיות בגובה 3 מ' האחת ועוד קומות כניסה ומחסנים בגובה 9 מ'). ההנפות התבצעו משטח C בקרקע אל קומה 20 באזור 1. בעבור כל הנתונים הללו חושבו אזורי נראות ונסתרות. טבלה 7-1 מציגה את התוצאות מתוך המדידות הידניות (המתאימות לניסוי זה) ליום ה-31.8.10 בבוקר.

בחישוב החלק הנסתר מתוך ההנפה מהמודל, יש לקבוע את צורת דרך ההנפה של העגורנאי. ישנם אינסוף מסלולים תיאורטיים להעביר מטען מאזור מסוים בקרקע לאזור מסוים בבניין בעזרת עגורן. לצורך המחקר הונח שהעגורנאי מעלה תחילה את המטען עד לגובה הג בקו אנכי ישר ולאחר מכן המטען מועבר אופקית מעל המיקום בקומה, גם זאת בקו ישר (תנועה זו דורשת מהעגורנאי להפעיל שתי תנועות בו-זמנית – צידוד הזרוע והנעת העגלה לאורך הזרוע – כפי שמקובל בעבודה עם עגורן). מסלול זה הינו מסלול מקובל להנפה מסוג זה. חישוב תאחוז הקטע העיוור מתוך ההנפה נעשה ע"י מציאת היחס בין אורך ההנפה בתוך האזור הנסתר לבין סך כל המרחק באותה הנפה.

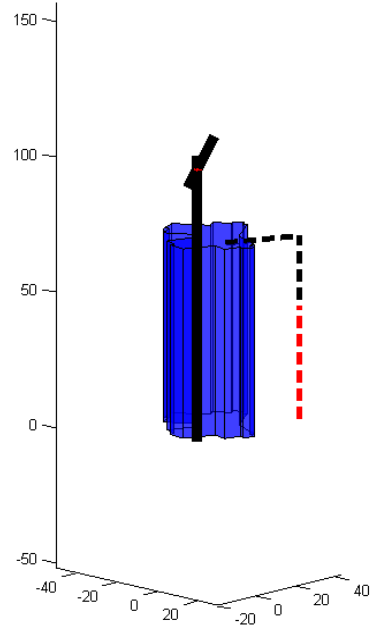
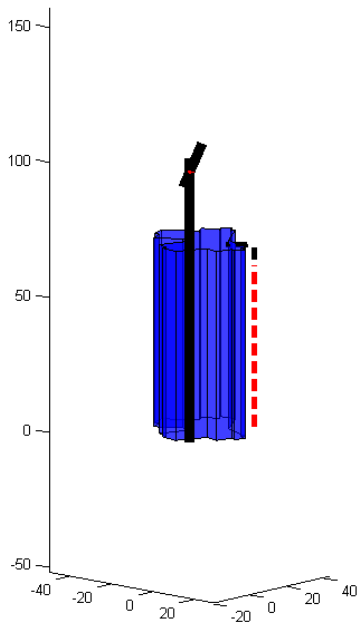
טבלה 7-1 תאחוז הזמן העיוור של חמש תצפיות שנעשו באותו יום מאותו אזור בקרקע לאותו אזור

בבניין

זמן הנפה כולל	זמן עיוור מתוך ההנפה	תאחוז הזמן העיוור
00:02:01	00:01:30	74%
00:03:17	00:02:12	67%
00:02:48	00:02:18	82%
00:01:44	00:00:56	54%
00:02:05	00:01:33	74%

ישנו קושי מסוים בהגדרת מיקום מדויק מתוך התצפיות הידניות. אזורי העבודה חולקו לשטחים גדולים ויש השפעה ניכרת על המיקום המדויק בתוך אותו אזור. אולם, חישוב מקרי קיצון ייתן את הגבולות למשך זמן ההנפה בשטח עיוור הצפוי מאותו אזור.

התוצאות שהתקבלו מתוך המודל הן 50% הנפה עיוורת במקרה הטוב ביותר (כאשר המטען מונף רחוק מהבניין אל אזור רחוק מן הקצה של הקומה) ו-84% הנפה עיוורת במקרה הגרוע ביותר (כאשר המטען מונף קרוב לבניין אל אזור קרוב לקצה הקומה) (ר' איור 7-11). ואילו במדידות הידניות, אם נסתכל על התאחוזים שנמדדו (טבלה 7-1) כטווח אפשרי לזמן הימצאות וו העגורן בשטח נסתר, נמצא כי הטווח הינו בין 54% ל-82%. הנתונים שהתקבלו מהמודל נמצאים



איור 7-11 מטען המונף מאזור מסוים בקרקע לאזור מסוים בקומה. מימין: מקרה בו המטען מונף מהאזור הרחוק מהבניין בקרקע לאזור הקרוב למרכז הבניין בקומה; משמאל: מקרה בו המטען מונף מאותו אזור מהקטע הקרוב לבניין בקרקע לאזור הקרוב לקצה הבניין בקומה

8. סיכום ומסקנות

8.1 סיכום

עבודה זו בחנה, ברמה של מחקר גישוש, את ההיתכנות של שימוש בטכנולוגיות מתקדמות לצורך טיפול בבעיית מגבלת שדה הראייה של עגורן הצריח, מגבלה משמעותית המשפיעה מאוד על בטיחות העבודה באתר בנייה. הקושי המרכזי בניתוח בעיה זו נובע מחוסר היכולת לאמוד כמותית את שדה הראייה באתר נתון, ובפרט אמור הדבר לגבי הנפות עיוורות, שהן תוצאה של יחסים גיאומטריים באתר הבנייה. המחקר הציע שימוש בטכנולוגיית לייזר קרקעי לצורך תיאור תלת-ממדי של אתרי בנייה וסביבתם ולטובת יצירתו של מודל תלת-ממדי – שלא קיים עד היום – המאפשר להעריך באופן כמותי את שיעור הזמן בו עבודת העגורנאי סובלת ממגבלות הראייה שלו. מודל זה יכול לאפשר השקעה בשיפור בטיחות העבודה, כמו למשל תכנון מוקדם ומדויק של דרישות לאתתים לאורך כל מהלך הביצוע.

פותחו שני מודלים המספקים אמצעים משלימים לצורך עיבוד המידע. האחד מבוסס על מידול אתר הבנייה על פי הגיאומטריה המרחבית שבו בעוד שהשני מבוסס על יצירת מרחב דו-ממדי המתאר את שדה הראייה מנקודת המבט של העגורנאי ומאפשר תחקור נקודה במרחב אל מול מרחב זה.

8.2 מסקנות

המדידות הידניות, שנעשו לאורך זמן, בתקופות שונות במשך הבנייה, ותוך כדי מטלות מגוונות של העגורן, מהוות מדגם טוב לכלל אופי העבודה של העגורן באתר. המחקר הראה התאמה גבוהה בין מדידות אלו לבין התוצאות המתקבלות מתוך תחקור המודל הגיאומטרי שפותח מתוך סריקות הלייזר. כמו כן, ניתן ביסוס כמותי לשיעור ההנפות העוורות בבניינים מהסוג שהבניין באתר הניסוי מייצג: אם עד עתה "ידענו" שחלק מסוים מעבודת העגורן מתבצע בשטח מת, בא המחקר ונתן ערכים כמותיים לחלק זה.

יצוין שהמודל שפותח, בשונה ממודל "רגיל" של בניין הנותן אך ורק מידע שניתן לזהות בתוכניות הבניין, נותן גם מידע שמקורו אינו בתוכניות הבניין, כגון פיגומי עבודה, משטחים לשליפת טפסות מתועשות, ומעליות חיצוניות. אלה הם אלמנטים צמודים למעטפת הבניין, שבין היתר מהווים גם מכשולים, וניתן לחשוב על יתרונות רבים (למשל בכל מה שקשור לבטיחות העבודה עם העגורן, בפרט הנפות עוורות) שיש לייצוגם במודל.

ניתן, אם כן, להסיק כי שימוש במודלים שפותחו, בשלב תכנון וארגון האתר, יכול לייעל את עבודת העגורן ולהגביר את בטיחותה, בין אם דרך בחירה מיטבית של שטחי התארגנות ואחסון חומרים ואלמנטים להנפה, ובין אם דרך קביעת מיקום העגורן עצמו להפחתת כמות ההנפות העוורות, תוך תכנון לשימוש יעיל יותר באתתים במהלך הבנייה.

8.3 המשך מחקר

המחקר התמקד בפיתוח מודלים כמותיים לניתוח שדה הראיה של העגורנאי, ובחינת תוצאותיו. המודלים שפותחו הינם כלליים באופיים, אך נדרשת בחינתם והרחבתם אל מול סביבות עבודה שונות באופיין ואל מול מבנים בעלי אופי גיאומטרי אחר כולידציה.

כמו כן, על מנת לקבל קישור בין שיעור ההנפות העיוורות לבין אפיון מבנה מסוים ואפיון מטלות ההנפה באותו מבנה, קיים צורך לבחון סוגים שונים של אתרים תוך כדי שימוש במודל שפותח. בכך ניתן יהיה לבחון את חסינות המודל לסוגים שונים של מבנים. ככל שהמודל ייבדק על אתרים שונים יותר ומגוונים יותר, כך ניתן יהיה לחזות את אופי העבודה של העגורנאי ביתר דיוק.

המודל המבוסס שדה ראייה הציג גישת פתרון שאינה תלויה באופי המבנה אלא רק במידול ישיר של שדה הראיה של העגורנאי. מודל זה צפוי להתמודד באופן מיטבי עם הנפות עיוורות בשל היכולת לקבוע נראות/נסתרות בכל נקודה באתר. בהקשר זה, הרחבה בעלת עניין רב ותרומה פוטנציאלית לא מבוטלת תושג על ידי שילוב מערכת איכון וו העגורן, לדוגמא על ידי מיקום מקלט GPS על הוו. באופן זה, ניתן יהיה לקבוע באופן אוטונומי את מיקום הוו ומצבו אל מול העגורנאי לכל אורך המסלול, כולל ניתוח ריחוק הוו מהמבנה עצמו. דרך זו תאפשר ניטור מצב ההנפה והתראה. יש בה הפוטנציאל להפחית מהעומס והאחריות המוטלים על האתת בזמן ההנפה. ללא הידע הגיאומטרי, לא ניתן היה לקבוע זאת. אך שילוב המידע הגיאומטרי ואיכון הוו מספקים תשתית למערכת בעלת פוטנציאל לאוטומציה.

שילוב נוסף המשלב מידע על מיקום הוו ועל גיאומטריית המבנה, יכול להתייחס לאופטימיזציית מסלולי ההנפה אל מול המבנה המהווה מכשול. יש בניתוח מבוסס גישה זו פוטנציאל לייעול ההנפות וחסכון בזמן ועלויות.

מראי מקום

חלוקת ציוד הנדסי לפי שנות ייצור (2005). האגף לשרותי מידע, משרד התחבורה, חולון, ישראל.

לשכה מרכזית לסטטיסטיקה (2005). מועסקים על פי ענף כלכלי, <www.cbs.gov.il>

משרד התעשייה, המסחר, והתעסוקה (2004). תאונות עבודה שהסתיימו במוות 1995-2004, <www.moit.gov.il>

עגורנאים, מפעילי מכונות הרמה אחרות ואתרים (1992). תקנות הבטיחות בעבודה, משרד התעשייה המסחר והתעסוקה, ישראל.

עגורני צריח (1966). תקנות הבטיחות בעבודה, משרד התעשייה המסחר והתעסוקה, ישראל.

שפירא, א', ולחין, ב' (2004). פיתוח מדדים כמותיים להערכת הסיכון הבטיחותי באתרי בנייה עם עגורני צריח, שלב א: איתור וניתוח של גורמי סיכון, דוח מחקר, המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה.

שפירא, א', ושמחה, מ' (2005). פיתוח מדדים כמותיים להערכת הסיכון הבטיחותי באתרי בנייה עם עגורני צריח, שלב ב: שקלול גורמי הסיכון ומתכונת לפיתוח סקלות סיכון, דוח מחקר, המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה.

שפירא, א', שמחה, מ', וגולדנברג, מ' (2009). פיתוח מדדים כמותיים להערכת הסיכון הבטיחותי באתרי בנייה עם עגורני צריח, שלב ג: פיתוח סקלות סיכון, אינטגרציה, ויישום המודל המוצע, דוח מחקר, המכון הלאומי לחקר הבנייה, טכניון, חיפה.

Abo-Akel, N., Filin, S., and Doytsher, Y. (2006). "Reconstruction of buildings from airborne laser scanning data." *Proc. Ann. Conf. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, Reno, Nev. (CD-ROM).

Akca, D., Gruen, A., Alkis, Z., Demir, N., Breuckmann, B., Erduyan, I., and Nadir, E. (2006). "3D modeling of the Weary Herakles statue with a coded structured light system." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI(5), 14–19.

Akinci, B., Boukamp, F., Gordon, C., Huber, D., Lyons, C., and Park, K. (2006). "A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control." *Automation in Construction*, 15(2), 124–138.

Alshawabkeh, Y., and Haala, N. (2005). "Automatic multi-image photo-texturing of complex 3D scenes." *CIPA, XX Int. Symp.*, Torino, Italy.

Arayici, Y. (2007). "An approach for real world data modelling with the 3D terrestrial laser scanner for built environment." *Automation in Construction*, 16(6), 816–829.

Barber, D. M., Mills, J. P., and Bryan, P. G. (2005). "Maintaining momentum in terrestrial laser scanning: A UK case study." *Proc. ISPRS Workshop*, XXXVI, 126–131, Enschede, The Netherlands.

Blayse, A. M., and Manley, K. (2004). "Key influences on construction innovation." *Construction Innovation*, 4(3), 143–154.

Bosche, F., and Haas, C. T. (2008). "Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images." *Automation in Construction*, 17(4), 499–512.

Bosche, F., Haas, C. T., and Akinci, B. (2009). "Automated recognition of 3D CAD objects in site laser scans for project 3D status visualization and performance control." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 23(6), 311–318.

Boukamp, F., and Akinci, B. (2007). "Automated processing of construction specifications to support inspection and quality control." *Automation in Construction*, 17(1), 90–106.

Chang, K. T., Chang, J. R., and Liu, J. K. (2005). "Detection of pavement distresses using 3D laser scanning technology." *Proc. ASCE Int. Conf. Computing in Civil Engineering*, Cancun, Mexico.

Chen, Y. C., Chi, H. L., and Kang, S. C. (2011). "A smart crane operations assisted system using augmented reality technology." *Proc., 28th Int. Symp. Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, Seoul, Korea.

Cheok, G. S., Stone, W. C., Lipman, R. R., and Witzgall, C. (2000). "Ladars for construction assessment and update." *Automation in Construction*, 9(5), 463–477.

Du, J.-C., and Teng, H.-C. (2007). "3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation." *Automation in Construction*, 16(5), 657–663.

Dubois, A., and Gadde, L.-E. (2002). "The construction industry as a loosely coupled system: implications for productivity and innovation." *Construction Management and Economics*, 20(7), 621–631.

El-Omari, S., and Moselhi, O. (2008). "Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work." *Automation in Construction*, 18(1), 1–9.

Filho, J. N. O., Su, Y. Y., Song, H., Liu, L. Y., and Hashash, Y. M. A. (2005). "Field tests of 3D laser scanning in urban excavation." *Proc. ASCE Int. Conf. Computing in Civil Engineering*, Cancun, Mexico.

Finno, R.J., and Hashash, Y.M.A. (2006). "Integrating tools to predict, monitor and control deformation due to excavations." *Proc. ASCE GeoCongress*, Atlanta, Ga.

Franaszek, M., Cheok, G. S., and Witzgall, C. (2009). "Fast automatic registration of range images from 3D imaging systems using sphere targets." *Automation in Construction*, 18(3), 265–274.

Gilsinn, D. E., Cheok, G. S., and O'Leary, D. P. (2004). "Reconstructing images of barcodes for construction site object recognition." *Automation in Construction*, 13(1), 21–35.

Girardeau-Montaut, D., Rouxa, M., Marc, R., and Thibault, G. (2005). "Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36(3/W19), 30–35.

Goedert, J., Bonsell, J., and Samura, F. (2005). "Integrating laser scanning and rapid prototyping to enhance construction modeling." *Journal of Architectural Engineering*, 11(2), 71–74.

Gomez, F., Althoefer, K., and Seneviratne, L. D. (2006). "Simulation of ultrasound imaging inside fully charged pipes." *Automation in Construction*, 15(3), 355–364.

Gong, J., and Caldas, C. H. (2008). "Data processing for real-time construction site spatial modeling." *Automation in Construction*, 17(5), 526–535.

Gordon, C., and Akinci, B. (2005). "Technology and process assessment of using LADAR and embedded sensing for construction quality control." *ASCE Construction Res. Cong.*, San Diego, Calif, 557–561.

Gordon, C., Akinci, B., Boukamp, F., and Huber, D. (2005). "Assessment of visualization software for support of construction site inspection tasks using data collected from reality capture technologies." *Proc. ASCE Int. Conf. Computing in Civil Engineering*, Cancun, Mexico.

Gordon, S. J., and Lichti, D. D. (2007). "Modeling terrestrial laser scanner data for precise structural deformation measurement." *Journal of Surveying Engineering*, 133(2), 72–80.

Gordon, S., Lichti, D., Franke, J., and Stewart, M. (2004). "Measurement of structural deformation using terrestrial laser scanners." *Archives of 1st FIG Int. Symp. Engineering Surveys for Construction Works and Structural Engineering*, Nottingham, UK.

Hashash, Y. M. A., Filho, J. N. O., Su, Y. Y., and Liu, L. Y. (2005). "3D laser scanning for tracking supported excavation construction." *Proc. Sessions Geo-Frontiers Cong.*, ASCE, Austin, Tex.

Hashash, Y. M. A., and Finno, R. J. (2008). "Development of new integrated tools for predicting, monitoring, and controlling ground movements due to excavations." *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 13(1), 4–10.

Hashash, Y. M. A., Liu, L. Y., Ghaboussi, J., Marulanda, C., Su, Y. Y., Song, H., and Osouli, A. (2006a). "New technologies for tracking urban excavation progress and estimating deformations." *Proc. Sessions GeoShanghai*, ASCE, Shanghai, China.

Hashash, Y. M. A., Liu, L., Su, Y.-Y., and Song, H. (2006b). "Use of new technologies for tracking excavation progress." *Proc. ASCE GeoCongress*, Atlanta, Ga.

Häkkinen, K. (1993). "Crane accidents and their prevention revisited." *Safety Science*, 16(2), 267–277.

Hinze, J. W., and Teizer, J. (2011). "Visibility-related fatalities related to construction equipment." *Safety Science*, 49(5), 709–718.

Howes, R. (2005). "An eye in the sky." *Cranes Today*, 370, 48–50.

Kim, C., Haas, C. T., and Liapi, K. A. (2005). "Rapid, on-site spatial information acquisition and its use for infrastructure operation and maintenance." *Automation in Construction*, 14(5), 666–684.

Kudla, W. (2008). "A new density measuring device with laser technique." *Proc. ASCE GeoCongress*, New Orleans, La.

Kwak, I., Morris, A., Silver, D., Kratzer, E., Vandapel, N., and Thayer, S. (2007). "LADAR-based pipeline inspection and location." *Proc. Pipelines Int. Conf.* ASCE, Boston, Mass.

Kwon, S.-W., Bosche, F., Kim, C., Haas, C. T., and Liapi, K. A. (2004). "Fitting range data to primitives for rapid local 3D modeling using sparse range point clouds." *Automation in Construction*, 13(1), 67–81.

Lee, G., Kim, H.-H., Lee, C.-J., Ham, S.-I., Yun, S.-H., Cho, H., Kim, B. K., Kim, G. T., and Kim, K. (2009). "A laser-technology-based lifting-path tracking system for a robotic tower crane." *Automation in Construction*, 18(7), 865–874.

Lee, U.-K., Kang, K.-I., Kim, G.-H., and Cho, H.-H. (2006). "Improving tower crane productivity using wireless technology." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 21(8), 594–604.

Levoy, M., Pulli, K., Curless, B., Rusinkiewicz, S., Koller, D., Pereira, L., Ginzton, M., Anderson, S. E., Davis, J., Ginsberg, J., Shade, J., and Fulk, D. (2000). "The digital Michelangelo project: 3D scanning of large statues." *Proc. 27th Ann. Conf. Computer Graphics (SIGGRAPH)*, New Orleans, La, 131–144.

Li, B., Cao, Q., Zhang, L., Lee, J., Leng, C., and Li, Y. (2010). "3D surface modeling and measuring system for pneumatic caisson." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), 223–240.

Lytle, A., Katz, I., and Saidi, K. S. (2005). "Performance evaluation of a high-frame rate 3D range sensor for construction applications." *Proc. Int. Symp. Automation and Robotics in Construction*, Ferrera, Italy.

MacCollum, D. V. (1993). *Crane hazards and their prevention*, American Society of Safety Engineers, Des Plaines, Ill.

Neitzel, R. L., Seixas, N. S., and Ren, K. K. (2001). "A review of crane safety in the construction industry." *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 16(12), 1106–1117.

Olsen, M. J., Johnstone, E., Driscoll, N., Ashford, S. A., and Kuester, F. (2009). "Terrestrial laser scanning of extended cliff sections in dynamic environments: parameter analysis." *Journal of Surveying Engineering*, 135(4), 161–169.

Olsen, M. J., Kuester, F., Chang, B. J., and Hutchinson, T. C. (2010). "Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), 264–272.

Orlaco (2006). Orlaco Products BV, Barneveld, The Netherlands (www.oralco.com).

Pagounis, V., Tsakiri, M., Palaskas, S., Biza, B., and Zaloumi, E. (2006). "3D laser scanning for road safety and accident reconstruction." *Archives of XXIII FIG Cong.*, Munich, Germany.

Peurifoy, R. L., Schexnayder, C. J., and Shapira, A. (2006). *Construction planning, equipment, and methods*, 7th Ed., McGraw-Hill, Boston.

Rosenfeld, Y. (1994). "Innovative construction methods." *Construction Management and Economics*, 12(6), 521–541.

Ross, B. (1996). "A crane and rigging accident primer: costs, case histories and remedies." *Implementation of safety and health on construction sites, Proc., 1st Int. Conf., CIB W99*, L. M. Alves Dias and R. J. Coble, eds., Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 259–271.

Sarti, P., Vittuari, L., and Abbondanza, C. (2009). "Laser scanner and terrestrial surveying applied to gravitational deformation monitoring of large VLBI telescopes' primary reflector." *Journal of Surveying Engineering*, 135(4), 136–148.

Sertyesilisik, B., Tunstall, A., and McLouglin, J. (2010). "An investigation of lifting operations on UK construction sites." *Safety Science*, 48(1), 72–79.

Shapira, A. (2008). "Equipment for Concrete Building Construction," in E. G. Nawy, Editor, *Concrete Construction Engineering Handbook*, 2nd Ed., CRC Press, Boca Raton, Fla.

Shapira, A., and Glascock, J. D. (1996). "Culture of using mobile cranes for building construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(4), 298–307.

Shapira, A., Lucko, G., and Schexnayder, C. J. (2007). "Cranes for building construction projects." *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(9), 690–700.

Shapira, A., and Lyachin, B. (2009). "Identification and analysis of factors affecting safety on construction sites with tower cranes." *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(1), 24–33.

Shapira, A., Rosenfeld, Y., and Mizrahi, I. (2008). "Vision system for tower cranes." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(5), 320–332.

Shapiro, H. I., Shapiro, J. P., and Shapiro, L. K. (2000). *Cranes and derricks*, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York.

Slaughter, E. S. (1998). "Models of construction innovation." *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(3), 226–231.

Son, H., Kim, C., and Choi, K. (2010). "Rapid 3D object detection and modeling using range data from 3D range imaging camera for heavy equipment operation." *Automation in Construction*, 19(7), 898–906.

Sternberg, H. (2006). "Deformation measurements at historical buildings with terrestrial laser scanners." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVI(5), 303–308.

Su, Y. Y., Filho, J. N. O., Liu, L. Y., and Hashash, Y. M. A. (2005). "Integration of construction field data and geotechnical analyses." *Proc. Construction Res. Cong.*, ASCE, San Diego, Calif.

Su, Y. Y., Hashash, Y. M. A., and Liu, L. Y. (2006). "Integration of construction as-built data via laser scanning with geotechnical monitoring of urban excavation." *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(12), 1234–1241.

Takhirova, S. (2010). "Laser scanners in structural assessment and finite element modeling." *Proc. ASCE Structures Cong.*, Orlando, Fla.

Tam, C. M., Leung, A. W. T., and Liu, D. K. (2002). "Nonlinear models for predicting hoisting times of tower cranes." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(1), 76–81.

Tang, P., Akinci, B., and Huber, D. (2009). "Quantification of edge loss of laser scanned data at spatial discontinuities." *Automation in Construction*, 18(8), 1070–1083.

Tatum, C. B. (1987). "Process of innovation in construction firms." *Journal of Construction Engineering and Management*, 113(4), 648–663.

Teizer, J., Allread, B. S., and Mantripragada, U. (2010a). "Automating the blind spot measurement of construction equipment." *Automation in Construction*, 19(4), 491–501.

Teizer, J., Allread, B. S., Fullerton, C. E., and Hinze, J. (2010b). "Autonomous proactive real-time construction worker and equipment operator proximity safety alert system." *Automation in Construction*, 19(5), 630–640.

Thayer, S. M., Brown, W., and Hallmark, M. (2009). "New construction verification by measurement of ovality and deflection with 3-D LADAR." *Proc. WEF*, 457–463

Trupp, T., Marulanda, C., Hashash, Y., Liu, L., and Ghaboussi, J. (2004). "Novel technologies for tracking construction progress of deep excavations." *Proc. Geotechnical Engineering for Transportation Projects*, ASCE, Los Angeles.

Vallely, I. (2005). "A simple idea." *Cranes Today*, 363, 5.

Visintini, D., Crosilla, F., and Sepic, F. (2006). "Laser scanning survey of the Aquileia basilica (Italy) and automatic modeling of the volumetric primitives." *Proc. ISPRS Commission V Symp.*, Dresden, Germany.

Walters, R. C., and Jaselskis, E. (2005). "Using scanning lasers for real-time pavement thickness measurement." *Proc. ASCE Int. Conf. Computing in Civil Engineering*, Cancun, Mexico.

Walters, R., Jaselskis, E., Zhang, J., Mueller, K., and Kaewmoracharoen, M. (2008). "Using scanning lasers to determine the thickness of concrete pavement." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(8), 583–591.

נספחים

נספח א'

טבלאות המדידה

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 05.07.2010 שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוו-רוחות שם המפעיל: פריד מאלמה: עס/בל

מס'	מטען	מ':	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן תאי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	תערות
1	תבנית ריק	C	15.3	13:14:05	13:16:11	13:16:13	13:14:05	13:16:41	13:18:09	00:04:04	00:02:36	63.9	
2	ריק	15.3	C	13:18:28	13:19:11	13:19:23	13:20:37	13:21:41	13:21:41	00:03:13	00:01:04	33.2	
3	משטח נפול	C	16.2	13:22:09	13:23:51	13:24:19	13:24:08	13:24:32	13:25:27	00:03:18	00:00:24	12.1	כולל שימון בהתחלה
4	ריק	16.2	C	13:26:05	13:28:15	13:29:11	13:30:05	13:30:25	13:30:25	00:04:20	00:00:20	7.7	
5	משטח אבן לחיפוי	C	16.2	13:30:25	13:30:51	13:30:52	13:30:52	13:31:35	13:33:25	00:03:00	00:00:43	23.9	עוקף עמרו 2 שמתפריע
6	ריק	16.2	B	13:33:41	13:35:33	13:35:35	00:00:00	00:00:00	13:38:14	00:04:33	00:00:00	0	
7	תבנית	B	16.2	13:40:25	13:41:37	13:41:42	00:00:00	00:00:00	13:43:21	00:02:56	00:00:00	0	
8	ריק	16.2	16.2	13:43:31	13:43:55	13:47:45	00:00:00	00:00:00	13:49:50	00:06:19	00:00:00	0	
9	תבנית	16.2	C	13:50:11	13:50:50	13:51:20	13:50:32	13:52:00	13:52:00	00:01:49	00:01:28	80.7	
10	ברזל	C	B	13:55:29	13:57:29	14:01:18	13:55:29	14:01:46	14:02:45	00:07:16	00:06:17	86.5	עוקף עמרו 2 שמתפריע
11	ריק	B	B	14:03:00	14:03:52	14:03:53	00:00:00	00:00:00	14:04:40	00:01:40	00:00:00	0	
12	תבנית	B	16.2	14:04:50	14:05:27	14:05:32	00:00:00	00:00:00	14:09:22	00:04:32	00:00:00	0	
13	תבנית	16.3	16.2	14:10:15	14:10:44	14:10:51	00:00:00	00:00:00	14:11:35	00:01:20	00:00:00	0	
14	ריק	16.2	C	14:11:35	14:12:35	14:12:45	14:13:10	14:18:13	14:18:13	00:06:38	00:05:03	76.1	
15	ברזל	C	16.3	14:18:35	14:21:13	14:21:17	14:23:35	14:23:49	14:24:17	00:05:42	00:00:14	4.1	
16	צמורות	16.3	16.2	14:24:17	14:24:21	14:24:23	00:00:00	00:00:00	14:25:23	00:01:06	00:00:00	0	
17	ריק	16.2	C	14:26:24	14:26:45	14:28:10	14:29:40	14:32:40	14:32:40	00:06:16	00:03:00	47.9	

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 09.07.2010 שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: מות-רוחות שם המפעיל: פריד מצלמה: עם/בלי

מס'	מטען	מ:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן חצי מחדר	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
1	תבנית	15.3	C	09:44:01	09:44:38	09:44:51	09:46:21	09:46:36	09:46:36	00:02:35	00:00:15	9.7	
2	משטח אבן לחיפוי	C	15.3	10:04:12	10:06:21	10:06:25	10:04:12	10:06:40	10:08:18	00:04:06	00:02:28	60.2	עוקף עמור 2 שטפריע
3	ריק	15.3	C	10:08:28	10:09:20	10:09:21	10:10:34	10:11:58	10:11:58	00:03:30	00:01:24	40.0	
4	תבנית	C	16.2	10:12:00	10:13:50	10:14:08	10:14:08	10:14:32	10:15:58	00:03:58	00:00:24	10.1	כולל שימון בהתחלה
5	ריק	16.2	C	10:16:03	10:18:55	10:19:00	10:20:05	10:20:25	10:20:25	00:04:22	00:00:20	7.6	עוקף עמור 2 שטפריע
6	משטח אבן לחיפוי	C	16.2	10:20:30	10:20:50	10:20:51	10:20:51	10:21:25	10:23:22	00:02:52	00:00:34	19.8	
7	ריק	16.2	B	10:23:30	10:25:23	10:25:23	00:00:00	00:00:00	10:28:11	00:04:41	00:00:00	0	
8	סכנים	B	16.2	10:30:20	10:31:35	10:31:42	00:00:00	00:00:00	10:33:22	00:03:02	00:00:00	0	
9	ריק	16.2	16.2	10:33:28	10:33:50	10:37:45	00:00:00	00:00:00	10:39:50	00:06:22	00:00:00	0	
10	תבנית	16.2	C	10:40:05	10:40:50	10:41:20	10:40:32	10:42:00	10:42:00	00:01:55	00:01:28	76.5	
11	תבנית שולחן	C	B	10:45:29	10:47:29	10:51:18	10:45:29	10:51:46	10:52:45	00:07:16	00:06:17	86.5	עוקף עמור 2 שטפריע
12	ריק	B	B	10:53:00	10:53:52	10:53:53	00:00:00	00:00:00	10:54:40	00:01:40	00:00:00	0	
13	תבנית	B	16.2	10:54:50	10:55:27	10:55:32	00:00:00	00:00:00	10:59:22	00:04:32	00:00:00	0	
14	תבנית	16.3	16.2	11:00:15	11:00:44	11:00:51	00:00:00	00:00:00	11:01:35	00:01:20	00:00:00	0	
15	ברל	16.2	C	11:01:35	11:02:35	11:02:45	11:03:10	11:08:13	11:08:13	00:06:38	00:05:03	76.1	
16	ריק	C	16.3	11:08:35	11:11:13	11:11:17	11:08:35	11:13:49	11:14:17	00:05:42	00:05:14	91.8	
17	רשת	16.3	16.2	11:14:11	11:14:21	11:14:23	00:00:00	00:00:00	11:15:23	00:01:12	00:00:00	0.0	
18	ריק	16.2	C	11:16:24	11:16:45	11:18:10	11:19:40	11:22:40	11:22:40	00:06:16	00:03:00	47.9	

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים תברת בנייה: דניה סיבוס עמרון: 1 (היום מחליפים כבל בעמרון הישני- עומס על העמרון הזה) תאריך: 26.07.2010 שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוח-רוחות שם המפעיל: פריד מצלמה: עם/בל

מס'	מטען	מ:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן תאי מחזור	זמן "עיוור" זמן	זמן "עיוור" זמן	הערות
1	תברית מפורקת	17.1	C	07:46:55	07:53:49	07:54:10	07:54:52	07:56:26	07:56:26	00:09:31	00:01:34	00:01:34	16.5
2	העלאת מקדחה גדולה	C	17.1	07:56:40	08:01:00	08:01:10	07:56:40	08:01:40	08:03:06	00:06:26	00:05:00	00:05:00	77.8
3	תברית	17.1	C	08:03:24	08:08:09	08:08:19	08:08:30	08:10:35	08:10:35	00:07:11	00:02:05	00:02:05	29.0
4	ריק	C	17.1	08:10:45	08:12:30	08:12:30	08:10:45	08:12:59	08:13:19	00:02:34	00:02:14	00:02:14	87.0
5	תברית	17.1	C	08:13:50	08:14:24	08:14:25	08:14:31	08:17:30	08:17:30	00:03:40	00:02:59	00:02:59	81.4
6	ריק	C	17.1	08:17:30	08:18:45	08:18:48	08:17:30	08:19:12	08:19:45	00:02:15	00:01:42	00:01:42	75.6
7	תברית	17.1	C	08:19:55	08:21:00	08:21:02	08:21:25	08:22:56	08:22:56	00:03:01	00:01:31	00:01:31	50.3
8	ריק	C	17.1	08:23:00	08:23:05	08:23:30	08:23:00	08:23:59	08:24:50	00:01:50	00:00:59	00:00:59	53.6
9	תברית	17.1	B	08:24:50	08:26:50	08:27:00	00:00:00	00:00:00	08:29:41	00:04:51	00:00:00	00:00:00	0
10	העלאת משטח שיט	B	17.1	08:29:50	08:37:50	08:38:34	00:00:00	00:00:00	08:40:18	00:10:28	00:00:00	00:00:00	0
11	תברית	17.1	C	08:41:31	08:42:30	08:42:35	08:42:50	08:44:09	08:44:09	00:02:38	00:01:19	00:01:19	50.0
12	ריק	C	17.1	08:44:30	08:45:00	08:45:00	08:44:30	08:45:28	08:46:50	00:02:20	00:00:58	00:00:58	41.4
13	תברית	17.1	C	08:47:00	08:48:01	08:48:03	08:48:34	08:50:06	08:50:06	00:03:06	00:01:32	00:01:32	49.5
14	משטח צימרות	B	17.3	08:50:18	08:52:15	08:52:20	00:00:00	00:00:00	08:53:45	00:03:27	00:00:00	00:00:00	0
15	תברית שילובית (קלה)	17.1	B	08:54:00	08:58:20	08:58:30	00:00:00	00:00:00	09:00:11	00:06:11	00:00:00	00:00:00	0
16	קורות פלדה לסימם	B	17.3	09:00:11	09:03:50	09:04:01	00:00:00	00:00:00	09:05:40	00:05:29	00:00:00	00:00:00	0

פריקת ת'
ב-C+איסוף
משטח
אינסטלציה

מס'	מטען	מ':	אלי:	התחלת טענינה/פריקה	סיום טענינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן תאי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
17	פיגום	17.3	B	09:05:50	09:12:35	09:12:45	00:00:00	00:00:00	09:13:24	00:07:34	00:00:00	0	
18	תבנית	C	17.1	09:13:30	09:16:42	09:16:50	09:13:30	09:17:26	09:18:28	00:04:58	00:03:56	79.2	פריקת פיגום ב-B ואיסוף מ
19	ריק	17.1	C	09:18:35	09:19:00	09:19:05	09:19:17	09:20:17	09:20:17	00:01:42	00:01:00	58.8	
20	תבנית	C	17.1	09:20:25	09:21:10	09:21:15	09:20:25	09:21:48	09:22:55	00:02:30	00:01:23	55.3	
21	ריק	17.3	C	09:23:18	09:25:30	09:25:40	09:25:50	09:27:00	09:27:00	00:03:42	00:01:10	31.5	
22	צנחות	C	17.1	09:27:25	09:27:37	09:27:39	09:27:25	09:28:10	09:28:50	00:01:25	00:00:45	52.9	
18	תבנית	17.1	B	09:28:59	09:48:50	09:48:57	00:00:00	00:00:00	09:50:07	00:21:08	00:00:00	0	פריקה + תליצה קשה
19	תבנית	B	17.1	09:50:20	09:53:50	09:58:00	00:00:00	00:00:00	10:00:35	00:10:15	00:00:00	0	
20	תבנית	17.1	B	10:00:40	10:08:45	10:10:05	00:00:00	00:00:00	10:11:49	00:11:09	00:00:00	0	
21	תבנית	C	17.1	10:12:40	10:16:45	10:16:55	10:12:40	10:17:39	10:18:50	00:06:10	00:04:59	80.8	
22	תבנית	16.1	17.1	10:19:36	10:31:25	10:31:30	00:00:00	00:00:00	10:33:40	00:14:04	00:00:00	0	פריקה ממושכת של תבנית והעמסת קרשים

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 01.08.2010 - בוקר שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוח-רוחות שם המפעיל: פריד מצלמה: עם/בלי

מס' מטען	מס' מטען	מ: אל:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן אחי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
1	ריק	B 18.1	10:18:42	10:19:00	10:19:04	00:00:00	00:00:00	10:22:45	00:04:03	00:00:00	0	
2	תבנית	B 17.3	10:22:55	10:24:33	10:24:35	00:00:00	00:00:00	10:30:00	00:07:05	00:00:00	0	תבנית פנימית גדולה
3	ברזלים	18.1 17.3	10:30:22	10:32:33	10:32:38	00:00:00	00:00:00	10:34:33	00:04:11	00:00:00	0	העברת חומר בין שתי נקודות במבנה
4		18.1 17.3	10:34:55	10:35:50	10:36:00	00:00:00	00:00:00	10:37:09	00:02:14	00:00:00	0	
5	ריק	B 18.1	10:38:00	10:38:20	10:38:24	00:00:00	00:00:00	10:39:30	00:01:30	00:00:00	0	
6	אריחי חיפוי ברזלים	B 18.1	10:40:00	10:40:33	10:41:15	00:00:00	00:00:00	10:43:20	00:03:20	00:00:00	0	
7	ברזלים	18.1 17.3	10:44:55	10:50:40	10:50:43	00:00:00	00:00:00	10:53:50	00:08:55	00:00:00	0	
8	ריק	18.1 17.3	10:53:59	10:54:09	10:54:30	00:00:00	00:00:00	10:55:45	00:01:46	00:00:00	0	

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים תברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1 תאריך: 01.08.2010 - ערב שם המודד: אביר ברנס מזג אויר: נוח-שקועה שם המפעיל: אבי מצלמה: עם/בלי

מס'	מטען	מ':	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן חצי מחזור	זמן "יעיוור"	אחוז זמן "יעיוור"	הערות
1	בטון מתקסר	B	17.3	17:28:00	17:29:10	17:29:25	00:00:00	00:00:00	17:31:40	00:03:40	00:00:00	0	מילוי ראשון
2	בטון- יציקה	17.3	B	17:31:50	17:35:22	17:35:27	00:00:00	00:00:00	17:36:28	00:04:38	00:00:00	0	פיזור איטי המלל עזרה מהעמון
3	בטון מתקסר	B	17.3	17:36:45	17:37:38	17:37:45	00:00:00	00:00:00	17:40:10	00:03:25	00:00:00	0	מילוי שני
4	בטון- יציקה	17.3	B	17:40:17	17:41:30	17:41:42	00:00:00	00:00:00	17:43:08	00:02:51	00:00:00	0	כולל פיזור
5	בטון מתקסר	B	17.3	17:43:14	17:44:45	17:44:55	00:00:00	00:00:00	17:47:05	00:03:51	00:00:00	0	מילוי שלישי
6	בטון- יציקה	17.3	B	17:47:10	17:49:30	17:49:36	00:00:00	00:00:00	17:50:50	00:03:40	00:00:00	0	כולל פיזור
7	בטון מתקסר	B	17.3	17:51:10	17:52:40	17:52:45	00:00:00	00:00:00	17:54:58	00:03:48	00:00:00	0	מילוי רביעי (אחרון)
8	בטון- יציקה	17.3	B	17:55:00	18:03:00	18:03:06	00:00:00	00:00:00	18:09:06	00:14:06	00:00:00	0	כולל פיזור + זמן המתנה למיקסר הבא
9	בטון מתקסר	B	17.3	18:09:11	18:12:30	18:12:38	00:00:00	00:00:00	18:15:46	00:06:35	00:00:00	0	מילוי ראשון ממיקסר 2 כולל ליקיחת דגימות
10	בטון- יציקה	17.3	B	18:15:50	18:25:46	18:25:50	00:00:00	00:00:00	18:27:00	00:11:10	00:00:00	0	כולל פיזור בשתי בקודות
11	בטון מתקסר	B	17.3	18:27:06	18:28:20	18:28:32	00:00:00	00:00:00	18:31:08	00:04:02	00:00:00	0	מילוי שני
12	בטון- יציקה	17.3	B	18:31:10	18:32:50	18:33:00	00:00:00	00:00:00	18:34:40	00:03:30	00:00:00	0	כולל פיזור

הערות	אחוז זמן "יעיוור"	זמן "יעיוור"	זמן מצי מחזור	סיום תנועה	סוף הנפה עיוורת	תחילת הנפה עיוורת	התחלת תנועה	סיום טעינה/פריקה	התחלת טעינה/פריקה	אלי:	מי:	מטען	מס'
מילוי שליש	0	00:00:00	00:03:00	18:37:50	00:00:00	00:00:00	18:35:26	18:35:18	18:34:50	17.3	B	בטון מתקסר	13
כולל פיזור	0	00:00:00	00:11:47	18:49:47	00:00:00	00:00:00	18:43:45	18:43:38	18:38:00	B	17.3	בטון - ביציקה	14
מילוי רביעי ואחרון	0	00:00:00	00:13:44	19:03:46	00:00:00	00:00:00	18:54:30	18:54:23	18:50:02	17.3	B	בטון מתקסר	15
כולל פיזור	0	00:00:00	00:08:03	19:11:55	00:00:00	00:00:00	19:06:52	19:06:46	19:03:52	B	17.3	בטון - ביציקה	16

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1 תאריך: 09.08.2010 - בוקר שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוח-רוחות שם המפעיל: פריד מצלמה: עס/בל

הערות	אחוז זמן "יעוור"	זמן זמן "יעוור"	זמן חצי מחזור	סיום תנועה	סוף הנפה עיוורת	תחילת הנפה עיוורת	התחלת תנועה	סיום טעינה/פריקה	התחלת טעינה/פריקה	אלי:	מי:	מטען	מס'
תליצה קשה של תבנית פיר	0	00:00:00	00:04:09	07:30:31	00:00:00	00:00:00	07:27:47	07:27:40	07:26:22	18.1	B	צינורות חשמל	1
עוזר למשאית	0	00:00:00	00:02:03	07:53:07	00:00:00	00:00:00	07:51:58	07:51:57	07:51:04	B	B	משטח אבן לחיפוי	3
עוזר למשאית	0	00:00:00	00:05:59	08:02:09	00:00:00	00:00:00	07:59:18	07:58:26	07:56:10	B	B	משטח אבן לחיפוי	4
עוזר למשאית	0	00:00:00	00:04:38	08:08:05	00:00:00	00:00:00	08:05:06	08:04:50	08:03:27		B	פגומים	5
עוזר למשאית	0	00:00:00	00:08:58	08:17:05	00:00:00	00:00:00	08:16:15	08:17:15	08:08:07	B	B	משטחים	6
	61.2	00:01:30	00:02:27	08:29:09	08:29:09	08:27:39	08:27:08	08:27:02	08:26:42	C	18.1	תבנית	7
	67.8	00:02:17	00:03:22	08:32:34	08:31:29	08:29:12	08:29:17	08:29:16	08:29:12	18.1	C	ריק	8
	78.9	00:02:18	00:02:55	08:35:30	08:35:30	08:33:12	08:32:42	08:32:40	08:32:35	C	18.1	תבנית	9
עיוב במקום התבנית למטה	60.0	00:01:12	00:02:00	08:37:35	08:36:47	08:35:35	08:35:51	08:35:50	08:35:35	18.1	C	ריק	10
מפנה מקום למשאית	0	00:00:00	00:13:51	08:57:46	00:00:00	00:00:00	00:00:00	00:00:00	08:43:55	B	B	העברות	12
	49.5	00:01:33	00:03:08	09:02:48	09:02:48	09:01:15	09:00:43	09:00:42	08:59:40	C	18.1	תבנית	13
	0	00:00:00	00:06:50	09:10:40	00:00:00	00:00:00	09:07:30	09:07:20	09:03:50	17.3	B	משטח שיש	14
שתי הורדות בקומה	0	00:00:00	00:07:06	09:20:26	00:00:00	00:00:00	09:15:55	09:14:50	09:13:20	18.1	E	ברל	15
	0	00:00:00	00:04:10	09:26:25	00:00:00	00:00:00	09:24:29	09:24:25	09:22:15	B	18.1	תבנית	16

הערות	אחוז זמן "יעיוור"	זמן "יעיוור"	זמן חצי מחזור	סיום תנועה	סוף הנפה עיוורת	תחילת הנפה עיוורת	התחלת תנועה	סיום טעינה/פריקה	התחלת טעינה/פריקה	אל:	מ:	מטען	מס'
	0	00:00:00	00:02:27	09:28:52	00:00:00	00:00:00	09:26:30	09:26:30	09:26:25	18.1	B	ריק	17
	0	00:00:00	00:05:33	09:34:33	00:00:00	00:00:00	09:31:49	09:31:47	09:29:00	B	18.1	תבנית שילובית (קלה)	18
כולל שמו לתבנית + תפית עגורנים	0	00:00:00	00:05:40	09:40:40	00:00:00	00:00:00	09:37:05	09:37:00	09:35:00	18.1	B	תבנית עמוד	19
תפית עגורן	0	00:00:00	00:09:55	09:50:35	00:00:00	00:00:00	09:47:39	09:47:36	09:40:40	B	18.1	תבנית	20
כולל שימון תבניות	0	00:00:00	00:05:00	09:57:30	00:00:00	00:00:00	09:54:46	09:53:16	09:52:30	18.1	B	תבנית	21

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים תברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 09.08.2010 - ערב שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: מוח-רוחות שם המתפעל: פריד מאלמה: עס/בל

מס'	מטען	מ:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן מצי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
1	ריק	18:1	C	16:18:25	16:35:00	16:35:05	16:36:18	16:37:08	16:37:08	00:18:43	00:00:50	4.4	בטעינה בגלל תפיפת עגורנים
2	תבנית	C	17.3	16:37:08	16:38:41	16:38:51	16:37:08	16:39:36	16:40:28	00:03:20	00:02:28	74.0	
3	ריק	17.3	C	16:40:42	16:46:35	16:46:41	16:47:04	16:47:57	16:47:57	00:07:15	00:00:53	12.2	
4	תבנית	C	17.3	16:48:00	16:48:23	16:48:25	16:48:00	16:48:57	16:49:45	00:01:45	00:00:57	54.3	
5	ריק	17.3	C	16:49:55	16:53:10	16:53:17	16:53:42	16:54:50	16:54:50	00:04:55	00:01:08	23.0	קולל
6	תבנית	C	17.3	16:54:56	16:56:19	16:56:29	16:54:56	16:57:15	16:58:15	00:03:19	00:02:19	69.8	שימון לתבנית
7	ריק	17.3	C	16:58:40	17:04:50	17:04:55	17:05:16	17:05:59	17:05:59	00:07:19	00:00:43	9.8	עיוב במיקום התבנית
8	תבנית	C	17.3	17:06:05	17:06:30	17:06:39	17:06:05	17:07:20	17:08:12	00:02:07	00:01:15	59.1	
9	ריק	17.3	C	17:08:20	17:14:10	17:14:12	17:14:51	17:15:39	17:15:39	00:07:19	00:00:48	10.9	
10	עמידה			17:16:05					18:47:15	01:31:10			עיוב בגלל תפיפת עגורנים

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 10.08.2010 שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוח-רוחות שם המפעיל: פריד מאלמה: עס/בל

מס'	מטען	מי:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן תצי מחזור	זמן "יעיוור"	אחוז זמן "יעיוור"	הערות
1	בטון תקרה	E	18.1	13:09:46	13:16:08	13:16:10	00:00:00	00:00:00	13:19:05	00:09:19	00:00:00	0	
2	דוד ריק בטון תקרה	E	18.1	13:19:07	13:21:20	13:21:22	00:00:00	00:00:00	13:22:30	00:03:23	00:00:00	0	כולל פיזור בקומה
3	בטון תקרה	E	18.1	13:22:38	13:23:08	13:23:08	00:00:00	00:00:00	13:25:31	00:02:53	00:00:00	0	
4	דוד ריק	E	18.1	13:25:35	13:28:50	13:29:50	00:00:00	00:00:00	13:30:50	00:05:15	00:00:00	0	כולל פיזור בקומה יש בעיות בתוף מכים בו שוב ושוב המיקסר הבא כבר מחכה כנראה בטון סמיר מדי
5	בטון תקרה	E	18.1	13:30:51	13:33:16	13:33:17	00:00:00	00:00:00	13:35:24	00:04:33	00:00:00	0	כולל דגימות למת"
6	דוד ריק	E	18.1	13:35:50	13:37:02	13:37:05	00:00:00	00:00:00	13:38:22	00:02:32	00:00:00	0	
7	בטון תקרה	E	18.1	13:38:37	13:39:47	13:39:51	00:00:00	00:00:00	13:41:50	00:03:13	00:00:00	0	סוף מיקסר 1
8	דוד ריק	E	18.1	13:41:52	13:42:51	13:42:52	00:00:00	00:00:00	13:44:40	00:02:48	00:00:00	0	
9	בטון תקרה	E	18.1	13:44:45	13:49:22	13:49:28	00:00:00	00:00:00	13:51:35	00:06:50	00:00:00	0	ערבוב נוסף - לקיחת דוגמא למת"

הערות	אחוד זמן "יעיוור"	זמן "יעיוור"	זמן חצי מחזור	סיום תנועה	סוף הנפה עיוורת	תחילת הנפה עיוורת	התחלת תנועה	סיום טעינה/פריקה	התחלת טעינה/פריקה	אל:	מ:	מטען	מס'
הבטון יבש מדי - אועקים לו מלמעלה - מים	0	00:00:00	00:06:05	13:57:50	00:00:00	00:00:00	13:56:05	13:56:01	13:51:45	E	18.1	דוד ריק	10
	0	00:00:00	00:06:18	14:06:05	00:00:00	00:00:00	14:01:17	14:01:15	13:59:47	18.1	E	בטון תקרה	11
פיזור קשה	0	00:00:00	00:04:54	14:11:03	00:00:00	00:00:00	14:07:47	14:07:43	14:06:09	E	18.1	דוד ריק	12
	0	00:00:00	00:05:49	14:16:54	00:00:00	00:00:00	14:11:52	14:11:51	14:11:05	18.1	E	בטון תקרה	13
פיזור קשה	0	00:00:00	00:06:28	14:23:29	00:00:00	00:00:00	14:18:16	14:18:16	14:17:01	E	18.1	דוד ריק	14
	0	00:00:00	00:06:17	14:29:48	00:00:00	00:00:00	14:24:13	14:24:11	14:23:31	18.1	E	בטון תקרה	15
פיזור קשה סוף - מיקסר 2	0	00:00:00	00:06:05	14:35:56	00:00:00	00:00:00	14:31:00	14:30:58	14:29:51	E	18.1	דוד ריק	16

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 31.08.2010 - בוקר שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוו-רוחות שם המפעיל: פריד מצלמה: עם/בל

מס'	מטען	מ: מ:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת תנועה	סיוף הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן תזי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
1	ריק	20.1	C	08:27:00	08:27:02	08:27:08	08:27:39	08:29:09	08:29:09	08:29:09	00:02:09	00:01:30	69.8	
2	תבנית	C	20.1	08:29:12	08:29:16	08:29:17	08:29:12	08:31:29	08:31:29	08:32:34	00:03:22	00:02:17	67.8	
3	ריק	20.1	C	08:32:35	08:32:40	08:32:42	08:33:12	08:35:30	08:35:30	08:35:30	00:02:55	00:02:18	78.9	
4	תבנית	C	20.1	08:35:35	08:35:50	08:35:51	08:35:35	08:36:47	08:36:47	08:37:35	00:02:00	00:01:12	60.0	עיכוב במקום התבנית למטה
5	ריק	20.1	C	08:37:36	08:38:28	08:38:30	08:38:56	08:42:25	08:42:25	08:42:25	00:04:49	00:03:29	72.3	מפנה מקום לשאית
6	העברות	B	B	08:43:55	08:43:55	08:43:55	08:43:55	08:43:55	08:43:55	08:43:55	00:13:51	00:00:00	0	
7	ריק	20.1	C	08:59:40	09:00:42	09:00:43	09:01:15	09:02:48	09:02:48	09:02:48	00:03:08	00:01:33	49.5	
8	משטח שיש	B	20.1	09:03:50	09:07:20	09:07:30	09:00:00	09:00:00	09:00:00	09:10:40	00:06:50	00:00:00	0	
9	ריק	20.1	E	09:10:40	09:10:43	09:11:27	09:11:27	09:10:00	09:10:00	09:13:20	00:02:40	00:00:00	0	
10	ברזל	E	20.1	09:13:20	09:14:50	09:15:55	09:15:55	09:13:20	09:13:20	09:20:26	00:07:06	00:00:00	0	שתי הורדות בקומה
11	ריק	20.1	B	09:22:15	09:24:25	09:24:29	09:24:29	09:26:25	09:26:25	09:26:25	00:04:10	00:00:00	0	
12	תבנית	B	20.1	09:26:25	09:26:30	09:26:30	09:26:30	09:28:52	09:28:52	09:28:52	00:02:27	00:00:00	0	
13	ריק	20.1	B	09:29:00	09:31:47	09:31:49	09:31:49	09:34:33	09:34:33	09:34:33	00:05:33	00:00:00	0	
14	תבנית עמוד	B	20.1	09:35:00	09:37:00	09:37:05	09:37:05	09:40:40	09:40:40	09:40:40	00:05:40	00:00:00	0	כולל שמו לתבנית + תפית עגורים
15	ריק	20.1	B	09:40:40	09:47:36	09:47:39	09:47:39	09:50:35	09:50:35	09:50:35	00:09:55	00:00:00	0	תפית עמורן
16	תבנית	B	20.1	09:52:30	09:53:16	09:54:46	09:54:46	09:57:30	09:57:30	09:57:30	00:05:00	00:00:00	0	כולל שימון תבניות

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמור: 1 תאריך: 31.08.2010 - ערב שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוח-שקיעה שם המפעיל: אבי מצלמה: עם/בל

מס'	מטען	מי:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן חצי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
1	בטון ממיקסר	B	20.1	17:17:00	17:18:08	17:18:25	00:00:00	00:00:00	17:20:47	00:03:47	00:00:00	0	מילוי ראשון ממיקסר 1 כולל לליות דגמות
2	בטון-ציקה	20.1	B	17:20:50	17:24:22	17:24:27	00:00:00	00:00:00	17:25:31	00:04:41	00:00:00	0	כולל פיזור
3	בטון ממיקסר	B	20.1	17:25:45	17:26:38	17:26:45	00:00:00	00:00:00	17:29:12	00:03:27	00:00:00	0	מילוי שני
4	בטון-ציקה	20.1	B	17:29:17	17:30:30	17:30:42	00:00:00	00:00:00	17:32:14	00:02:57	00:00:00	0	כולל פיזור
5	בטון ממיקסר	B	20.1	17:32:14	17:33:45	17:33:55	00:00:00	00:00:00	17:36:10	00:03:56	00:00:00	0	מילוי שלישי
6	בטון-ציקה	20.1	B	17:36:10	17:38:30	17:38:36	00:00:00	00:00:00	17:39:58	00:03:48	00:00:00	0	כולל פיזור
7	בטון ממיקסר	B	20.1	17:40:10	17:41:40	17:41:45	00:00:00	00:00:00	17:43:59	00:03:49	00:00:00	0	מילוי רביעי (אחרון)
8	בטון-ציקה	20.1	B	17:44:00	17:52:00	17:52:06	00:00:00	00:00:00	17:58:11	00:14:11	00:00:00	0	כולל פיזור +זמן המתנה למיקסר הבא
9	בטון ממיקסר	B	20.1	17:58:11	18:01:30	18:01:38	00:00:00	00:00:00	18:04:49	00:06:38	00:00:00	0	מילוי ראשון ממיקסר 2 כולל לליות דגמות
10	בטון-ציקה	20.1	B	18:04:50	18:14:46	18:14:50	00:00:00	00:00:00	18:16:06	00:11:16	00:00:00	0	כולל פיזור
11	בטון ממיקסר	B	20.1	18:16:06	18:17:20	18:17:32	00:00:00	00:00:00	18:20:10	00:04:04	00:00:00	0	מילוי שני
12	בטון-ציקה	20.1	B	18:20:10	18:21:50	18:22:00	00:00:00	00:00:00	18:23:48	00:03:38	00:00:00	0	כולל פיזור
13	בטון ממיקסר	B	20.1	18:23:50	18:24:18	18:24:26	00:00:00	00:00:00	18:26:58	00:03:08	00:00:00	0	מילוי שלישי
14	בטון-ציקה	20.1	B	18:27:00	18:32:38	18:32:45	00:00:00	00:00:00	18:38:58	00:11:58	00:00:00	0	כולל פיזור

הערות	אחיד זמן "עיוור"	זמן "עיוור"	זמן תצי מחזור	סיום תנועה	סוף הנפה עיוורת	תחילת הנפה עיוורת	התחלת תנועה	סיום טעינה/פריקה	התחלת טעינה/פריקה	אלי:	מי:	מטען	מס'
מילוי רביעי ואחרון	0	00:00:00	00:13:47	18:52:49	00:00:00	00:00:00	18:43:30	18:43:23	18:39:02	20.1	B	בטון ממיקטר	15
כולל פיזור	0	00:00:00	00:09:03	19:01:55	00:00:00	00:00:00	18:55:52	18:55:46	18:52:52	B	20.1	בטון-ציקה	16

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דנייה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 20.09.2010 - צהר"ים שם המודד: אברי ברנס מדג אויר: חם שם המפעיל: אבי מצלמה: עם/בלי

הערות	אחוז זמן "יעוור"	זמן "יעוור"	זמן תאי מחזור	סיום תנועה	סוף הנפה עיוורת	תחילת הנפה עיוורת	התחלת תנועה	סיום טעינה/פריקה	התחלת טעינה/פריקה	אלי:	מי:	מטען	מס'
העמסה ע"ג משאית	0	00:00:00	00:12:29	13:47:20	00:00:00	00:00:00	13:41:51	13:41:50	13:34:51	B	B	מיכל פלדה לפסולת בנין	2
החזרת המיכל למקום	0	00:00:00	00:01:38	13:49:39	00:00:00	00:00:00	13:49:01	13:49:06	13:48:01	B	B	מיכל פלדה לפסולת בנין	3
	931	00:01:34	00:01:41	13:56:52	13:56:45	13:55:11	13:56:03	13:56:02	13:55:11	21.1	C	תבנית	4
	28.7	00:02:07	00:07:23	14:04:22	14:04:22	14:02:15	14:01:50	14:01:45	13:56:59	C	21.1	תבנית	5
כולל שימון תבנית חליצה מפינת הביטן - עובד תלוי ברמתה	47.5	00:02:39	00:05:35	14:11:51	14:09:51	14:07:12	14:07:12	14:07:11	14:06:16	21.1	C	תבנית	6
	0	00:00:00	00:16:23	14:38:33	00:00:00	00:00:00	14:36:30	14:35:33	14:22:10	C	21.1	תבנית	7
	73.4	00:03:22	00:04:35	14:43:35	14:42:22	14:39:00	14:41:33	14:41:30	14:39:00	21.1	C	תבנית	8

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים תברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1 תאריך: 20.09.2010 - ערב שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: חם שם המפעיל: אבי מצלמה: עם/בל

מס'	מטען	מ:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיוורת	סוף הנפה עיוורת	סיום תנועה	זמן חצי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
1	בטון ממיקסר	B	22.1	17:09:15	17:13:41	17:13:47	00:00:00	00:00:00	17:17:35	00:08:20	00:00:00	0	מילוי ראשון 22 כולל מנו התקנים
2	בטון-יציקה	22.1	B	17:17:35	17:17:58	17:18:20	00:00:00	00:00:00	17:19:15	00:01:40	00:00:00	0	פיזור איטי הכולל עזרה מהעגורן
3	בטון ממיקסר	B	22.1	17:19:17	17:20:58	17:21:02	00:00:00	00:00:00	17:25:15	00:05:58	00:00:00	0	מילוי שני
4	בטון-יציקה	22.1	B	17:24:15	17:25:10	17:25:11	00:00:00	00:00:00	17:26:49	00:02:34	00:00:00	0	כולל פיזור
5	בטון ממיקסר	B	22.1	17:26:52	17:28:25	17:28:31	00:00:00	00:00:00	17:31:25	00:04:33	00:00:00	0	מילוי שלישי
6	בטון-יציקה	22.1	B	17:31:25	17:32:06	17:32:14	00:00:00	00:00:00	17:33:51	00:02:26	00:00:00	0	כולל פיזור
7	בטון ממיקסר	B	22.1	17:33:53	17:35:46	17:35:47	00:00:00	00:00:00	17:38:56	00:05:03	00:00:00	0	מילוי רביעי (אחרון) הדלקת אורות
8	בטון-יציקה	22.1	B	17:44:27	17:45:16	17:45:18	00:00:00	00:00:00	17:48:41	00:04:14	00:00:00	0	כולל פיזור זמן + המתנה למיקסר הבא
9	בטון ממיקסר	B	22.1	17:48:42	17:51:50	17:51:53	00:00:00	00:00:00	17:53:13	00:04:31	00:00:00	0	מילוי ראשון ממיקסר 2 כולל לקיחת דגימות

הערות	אחוז זמן "יעיוור"	זמן "יעיוור"	זמן תמי מחזור	סיום תנועה	סוף הנפה עיוורת	תחילת הנפה עיוורת	התחלת תנועה	סיום טעינה/פריקה	התחלת טעינה/פריקה	אלי:	מ:	מטען	מס'
כולל פיצור בשתי נקודות	0	00:00:00	00:03:38	17:56:57	00:00:00	00:00:00	17:54:05	17:54:02	17:53:19	B	22.1	בטון-יציקה	10
מילוי שני	0	00:00:00	00:07:42	18:04:40	00:00:00	00:00:00	18:02:56	18:02:55	17:56:58	22.1	B	בטון ממיקסר	11
כולל פיצור	0	00:00:00	00:02:43	18:07:51	00:00:00	00:00:00	18:05:45	18:05:42	18:05:08	B	22.1	בטון-יציקה	12
מילוי שילשי	0	00:00:00	00:03:39	18:11:34	00:00:00	00:00:00	18:09:43	18:09:41	18:07:55	22.1	B	בטון ממיקסר	13
כולל פיצור מילוי רביעי	0	00:00:00	00:05:50	18:17:52	00:00:00	00:00:00	18:14:35	18:14:31	18:12:02	B	22.1	בטון-יציקה	14
ואחרון פחות ממניכל מלא	0	00:00:00	00:04:51	18:22:49	00:00:00	00:00:00	18:20:16	18:20:14	18:17:58	22.1	B	בטון ממיקסר	15
כולל פיצור	0	00:00:00	00:03:49	18:26:51	00:00:00	00:00:00	18:24:49	18:24:46	18:23:02	B	22.1	בטון-יציקה	16

אתר: סקאי פולג יעוד: מגורים חברת בנייה: דניה סיבוס עמורן: 1
 תאריך: 14.03.2010 שם המודד: אברי ברנס מזג אויר: נוח-רוחות שם המפעיל: יפים מצלמה: עס/בל-י

מס'	מטען	מ:	אלי:	התחלת טעינה/פריקה	סיום טעינה/פריקה	התחלת תנועה	תחילת הנפה עיורת	סוף הנפה עיורת	סיום תנועה	זמן תאי מחזור	זמן "עיוור"	אחוז זמן "עיוור"	הערות
1	ברזל עודף	32.2	A	08:07:19	08:09:11	08:09:13	00:00:00	00:00:00	08:13:55	00:06:36	00:00:00	0	
2	ריק	A	32.2	08:27:29	08:27:30	08:27:30	00:00:00	00:00:00	08:29:51	00:02:22	00:00:00	0	אחרי המתנה ארוכה
3	ברזל עודף	32.2	A	08:45:10	08:45:16	08:45:18	00:00:00	00:00:00	08:50:25	00:05:15	00:00:00	0	אחרי המתנה ארוכה
4	ריק	A	32.2	08:50:25	08:50:51	08:50:52	00:00:00	00:00:00	08:52:57	00:02:32	00:00:00	0	
5	ברזל עודף	32.2	A	08:53:10	08:54:45	08:54:46	00:00:00	00:00:00	08:58:00	00:04:50	00:00:00	0	
6	ריק	A	32.2	08:58:00	08:58:07	08:58:07	00:00:00	00:00:00	09:00:00	00:02:00	00:00:00	0	מפנה מקום למשאיות
7	תבנית	32.2	C	09:00:00	09:00:42	09:00:43	09:01:20	09:03:52	09:03:52	00:03:52	00:02:32	65.5	
8	ריק (מקדחה)	C	32.2	09:03:52	09:03:58	09:03:58	09:03:52	09:05:31	09:06:14	00:02:22	00:01:39	69.7	
9	תבנית	32.2	C	09:06:14	09:10:02	09:10:02	09:14:42	09:14:42	09:14:42	00:08:28	00:04:02	47.6	עיובה בהעמסה עיובה בפריקה
10	שק ריק (ביג בג)	C	32.2	09:14:42	09:14:49	09:14:49	09:14:42	09:16:20	09:17:42	00:03:00	00:01:38	54.4	
11	תבנית	32.2	C	09:17:45	09:18:54	09:19:03	09:19:43	09:23:15	09:23:15	00:05:30	00:03:32	64.2	עיובה קל בפריקה

Abstract

Tower cranes are the main component of the production systems on modern construction sites. Almost every construction site of a public, commercial, industrial, or residential building operates with one, or sometimes several, tower cranes. Tower cranes have great impact on work safety on construction sites, not only due to their widespread use, but also because working with them inherently turns them into a potential safety hazard. Crane work is expressed by hoisting and transporting a variety of loads over the entire crane's workspace, including near and above people. Hence the high potential in increasing safety by focusing on typical hazards exerted by the crane's work.

Alongside traditional methods, there is nowadays a global trend of harnessing advanced technologies for the prevention of safety incidents. One of these is laser scanning, a relatively new technology having significant advantages for 3D measurements. The laser scanner provides fast and direct description of a 3D geometry, which is independent of lighting and weather conditions, and is automatically acquired. In recent years, laser-based mapping systems are becoming more and more widespread; among other uses there is a growing use of ground-based laser scanners generating 3D models of construction sites and classifying point clouds to various objects. There are many uses of laser scanners in construction industry, particularly in construction supervision and management. However, a comprehensive literature review conducted within this research did not find any laser-related study concerning cranes specifically.

Of the many safety issues associated with crane work, this research seeks to deal with the limitations of the field of view of the crane operator. These limitations potentially have grave safety implications that cannot be overemphasized. The common solution – the use of signalers – has not changed for decades. In recent years, crane-mounted camera-based vision aids that transmit images to the crane operator's cabin have been introduced. These solutions have various limitations, and in any case the decision to use them is in most cases not a result of a rational preliminary planning. The main difficulty lies in the inability to assess quantitatively the field of view at a given site. Such assessment could provide indication as to the rate of the concealed work zones in the course of the crane's work.

Today there is no model that allows the quantitative assessment of the rate of time during which the operator's work suffers from vision limitations. This pertains particularly to “blind lifts” (the term commonly used for lifting carried out while the operator's line of sight is disturbed), which are the result of geometric relationships. The ultimate goal of the research plan within which the current pilot study is conducted is to develop an approach to describe a construction site based on advanced technology of laser scans, and then to use this description for mapping the field of view of the tower crane's operator at the construction site. This description will form the basis for the

analysis and quantitative assessment of various safety issues related to the operator's field of view, and especially blind lifts.

This study consists of two main parts: manual measurements and laser scans. The main purpose of the manual measurements is to find factors that influence the tower crane's work cycles and to quantitatively examine the periods of working at blind spots in a typical work environment. The laser scanning data allows analyzing the field of view and exploring the workspace in terms of a single lift. Such tools can provide an indication about the nature of the lift operations at the construction site.

The study presents the development of two models that provide complementary tools for the information processing. One is based on modeling the construction site by its spatial geometry while the other is based on creating 2D space that describes the field of view from the crane operator's perspective and allows the exploration of a single point in space in relation to that 2D space. The study showed a high correlation between manual measurements and the results obtained from investigating the geometric model developed from the laser scan. It is possible, therefore, to conclude that the use of the models developed, during the site planning stage, can improve the efficiency and safety of the crane's work, whether through better selection of staging areas and location of craned elements and materials on site, or even through determining the location of the crane itself with a view to decreasing the amount of blind lifts and planning for more efficient use of signalers during construction.



Founded by מיסודם של

MINISTRY OF CONSTRUCTION AND HOUSING משרד הבינוי והשיכון

TECHNION ISRAEL INSTITUTE OF TECHNOLOGY הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

Faculty of Civil & Environmental Engineering הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

NATIONAL המכון
BUILDING הלאומי
RESEARCH לחקר
INSTITUTE הבנייה

2012937

Three Dimensional (3D) Information for Safety Management of Tower Cranes

**Assoc. Prof. Sagi Filin
Assoc. Prof. Aviad Shapira
Amit Wicnudel, B.Sc.**

Copyright © 2011 by S. Filin, A. Shapira, A. Wicnudel
Israel Ministry of Construction and Housing, and
Technion Research and Development Foundation, Ltd., Haifa

המכון לאומי לחקר הבנייה

קרית הטכניון, חיפה 3200003

טל. 04-8292242/3

nbri@tx.technion.ac.il

