

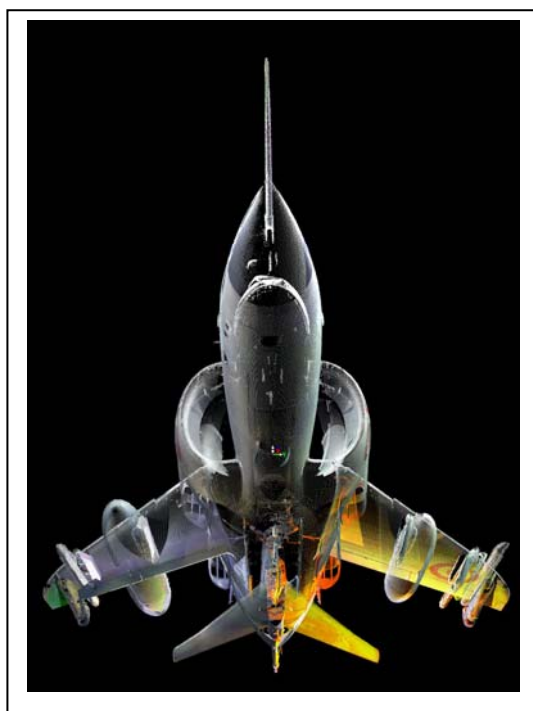
שימוש בסורק לייזר קרקעי לביצוע מדידות הנדסיות

אריק דגני – מבט טכנולוגיות בתלת-ממד בע"מ

משה בנחמו – ראש תחום קדסטר תלת-ממדי ויישומים מתקדמים, המרכז
למיפוי ישראל

תקציר

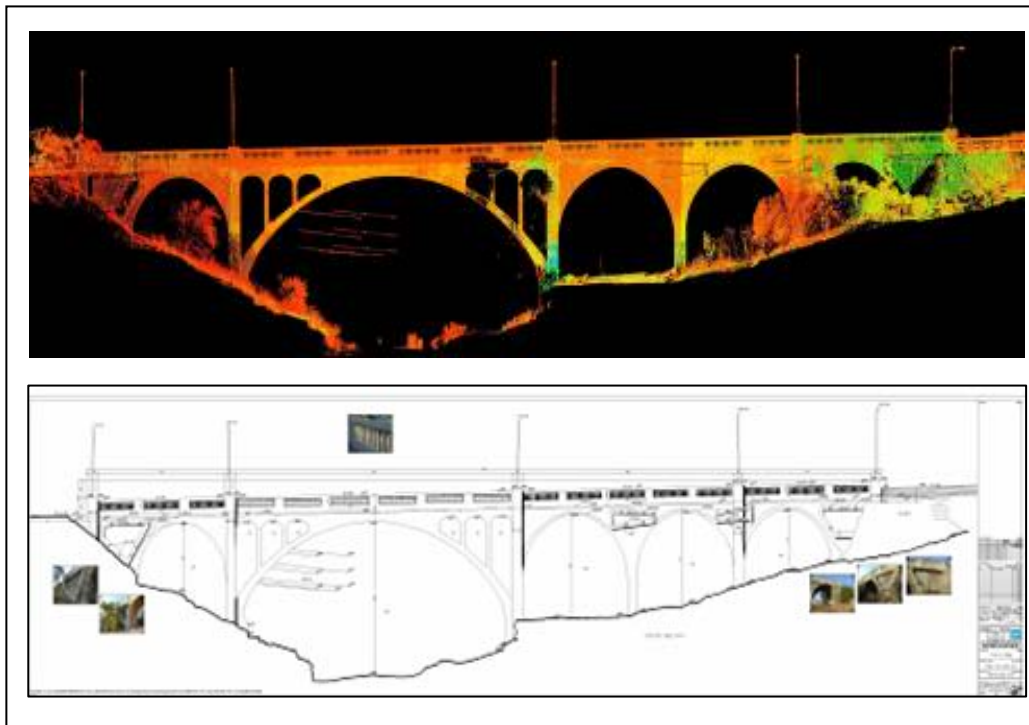
סורק הלייזר הקרקעי הינו מכשיר מדידה אקטיבי וחדשני, המתאפיין ברמת מחשוב גבוהה ותוכנות הפעלה ועיבוד מתקדמות (Waud M., 2004). סורק הלייזר הקרקעי מאפשר מדידה (ומיפוי) מערכתית – מהכלל אל הפרט, אוטומטית וממוכנת ברמות פירוט ודיוק גבוהים. מדידה יעילה, מהירה ואובייקטיבית (ללא האינטרפטציה של המודד). הסריקה מתבצעת תוך צבירת המידע והצגתו בזמן אמת - תוצר המדידה המידי המתקבל הינו ענן נקודות וקטורי, תלת-ממדי וצפוף מאוד המתאפיין ברמה גבוהה של ויזואליות (ראה ציור מס' 1). ענן הנקודות מהווה תיעוד מלא, אותנטי ו- Repeatability של האתר/האובייקט הנסרק (כנען ד., טסצ'יאב א. ודגני א., 2003).



ציור מס' 1 : ענן נקודות מסריקת מטוס קרב

היכולת של סורק הלייזר הקרקעי למדוד מאות אלפי ומליוני נקודות ברזולוציה גבוהה ובמהירות, משמעותה שניתן למדל בצורה מדויקת את העולם האמיתי.

סורק הלייזר הקרקעי הינו כלי מדידה ומיפוי מתקדם, חשוב וחדשני המהווה הדור הבא של מכשירי המדידה (Waud M., 2004). סורק הלייזר מתאים לביצוע כל סוג של מדידה אך אינו מתאים להתוויות ולשירותי ביצוע. טכנולוגית סריקת הלייזר הקרקעית מיושמת בעיקר לצורך מיפוי מפורט ויצירת מודלים תלת-ממדיים (מסוג Solid ו-Surface) ושרטוטים דו-ממדיים (כולל חתכים אנכיים), מדידת אובייקטים מורכבים (כולל אובייקטים תעשייתיים), מיפוי טופוגרפי ומצב קיים, מדידות ארכיאולוגיות, שימור ושיקום ארכיטקטוני, סקרי מערות, חישובי כמויות, מעקב אחר תזוזות של מבנים/קירות, בדיקה השוואתית בין תכנון למצב קיים, Re-Engineering ועוד (ראה ציור מס' 2).



ציור מס' 2: גשר רושמייה בחיפה – ענן נקודות אורתופוטו של חזית הגשר ושרטוט אדריכלי

מרכיב התוכנה של טכנולוגיית הסריקה, כולל מגוון רחב של כלים לעיבוד מתקדם של ענן הנקודות לקבלת מגוון רחב של תוצרים, בהם: מודל גבהים ספרתי מסוג Digital (DTM) Terrain Model), מודל גבהים מסוג (Digital Surface Model) DSM), קווי אי-רציפות, ניתוח נראות, קלסיפיקציה, יצירת אורתופוטו קרקעי אמיתי ועוד (Chow K. L., 2007).

יש פוטנציאל רב לשימוש בסורק הלייזר הקרקעי בתחום המדידה והמיפוי אשר עדיין לא מוצה. טכנולוגיה זו תאפשר את כניסתם של המודדים לתחומי פעילות בהם לא היו מעורבים עד כה ולביצוע עבודות מדידה מורכבות ומדויקות כולל הפקת תוצרי מיפוי איכותיים. עד כה נמכרו בכל העולם כ- 1,500 סורקים לשימושים שונים (מקצתם לתחום המדידה והמיפוי). בישראל נרכשו 4 סורקים – 2 סורקים משמשים גם לצורכי מדידה ומיפוי. השימוש המצומצם בסורקי הלייזר הקרקעיים בחברות המדידה והמיפוי בישראל נובע בעיקר בשל העלות הגבוהה יחסית של סורק הלייזר (כולל תוכנות) זאת ביחס למכשירי מדידה אחרים.

סורק הלייזר הקרקעי – עקרונות הפעולה

סורק הלייזר הקרקעי הינו מכשיר מדידה אקטיבי וחדשני, המתאפיין ברמת מחשוב גבוהה ותוכנות הפעלה ועיבוד מתקדמות. סורק הלייזר הקרקעי מאפשר מדידה מערכתית, אוטומטית, מהירה, אובייקטיבית, ברמות פירוט ודיוק גבוהים. הסריקה מתבצעת תוך צבירת המידע והצגתו בזמן אמת - תוצר המדידה המיידי המתקבל הינו ענן נקודות וקטורי, תלת-ממדי וצפוף מאוד המתאפיין ברמה גבוהה של ויזואליות. ענן הנקודות מהווה תיעוד מלא, אותנטי ו- Repeatability של האובייקט הנסרק (כנען ד., סצ'יאב א. ודגני א., 2003).

סורק הלייזר מבצע מדידה אקטיבית באמצעות קרן אלקטרומגנטית הנשלחת מהסורק אל האובייקט במרחב וקליטת ההחזר מן האובייקט (Chow K. L., 2007). רוחב קרן הלייזר המשודרת מהסורק באיזור הפגיעה באובייקט (Foot Print) הינו קטן כך שקרן הלייזר בעלת טביעה קטנה ומרוכזת ובכך מאפשרת מדידה מדויקת. סורק הלייזר הקרקעי מאיר את האובייקט הנסרק ואינו מסתמך על קליטת החזרים פסיביים (אופטיים) מהאובייקט.

בזמן הסריקה קרן הלייזר משודרת למרחב באמצעות שתי מראות ניצבות – האחת אנכית והשניה אופקית. ישנם סורקים בהם ישנה מראת פריזמה מסתובבת (במהירות של 3,000 סל"ד). קצב הסריקה משתנה בהתאם לסוג הסורק והוא נע בין 1,500 ל- 120,000 נקודות לשניה ויותר.

את סורק הלייזר הקרקעי ניתן (אך אין חובה) להציב בנקודת בקרה גאודטית ידועה. הסורק יוצב בעמדה כך שמירב האובייקט/האתר הנסרק ייכלל בשדה הראיה (FOV – Field Of View) של הסורק (Jenkins B., 2006). אזורים נסתרים אשר אינם מוארים על ידי הסורק לא יכללו בענן הנקודות המתקבל מהסריקה ולכן יש לתכנן את עמדות ההצבה של הסורק כך שתהיה "הארה" מלאה של האובייקט/האתר הנסרק.

ביצוע הסריקה תוך בקרה ומעקב, נעשה באמצעות מחשב נייד המחובר לסורק והכולל את תוכנת הסריקה והעיבוד. טרם ביצוע הסריקה, יבוצע באמצעות הסורק צילום (דגיטלי) של המרחב הנכלל בשדה הראיה של הסורק. בהתבסס על התצלום, יגדיר מפעיל הסורק את תחום המרחב הפיזי הרלוונטי ואת רזולוציית הסריקה (צפיפות רשת נקודות הסריקה).

תוך כדי הסריקה, המידע נצבר ומוצג במחשב הנייד למעקב ולבקרה של המפעיל. תוצר המדידה המיידי המתקבל במהלך הסריקה הינו ענן נקודות וקטורי ותלת-ממדי באיכות ויזואלית של תמונה דיגיטלית. המיקום במרחב של כל נקודה בענן מוגדר על ידי קואורדינטות X, Y ו-Z במערכת הסורק או בכל מערכת קואורדינטות אחרת. בנוסף, לכל נקודה בענן הנקודות מוגדר צבע המתאים לעוצמת החזר הפולס. עוצמת החזר תלויה במרחק האובייקט (רחוק מחזיר פחות), צבע האובייקט (כהה מחזיר פחות), לחות/רטיבות פני השטח (עוצמת החזר ממים נמוכה), זווית הפגיעה של קרן הלייזר (עוצמת החזר תגדל ככל שזווית הפגיעה תהיה חדה יותר).

הגדרת ענן הנקודות במערכת קואורדינטות שאינה מערכת הסורק מחייבת הצבת הסורק בנקודה ידועה (בדומה למדידה רגילה). במקרה בו בוצעה סריקה ממספר עמדות, תהליך ה"תפירה" של ענני הנקודות תעשה באמצעות מטרות רפלקטיביות המוצבות טרם הסריקה במרחב הנסרק ואשר יופיעו בבירור בסריקות השונות.



צילום מס' 3: סורקי לייזר קרקעיים של חברות Riegl, Leica ו-Cyrax

קריטריונים לבחירת סורק לייזר

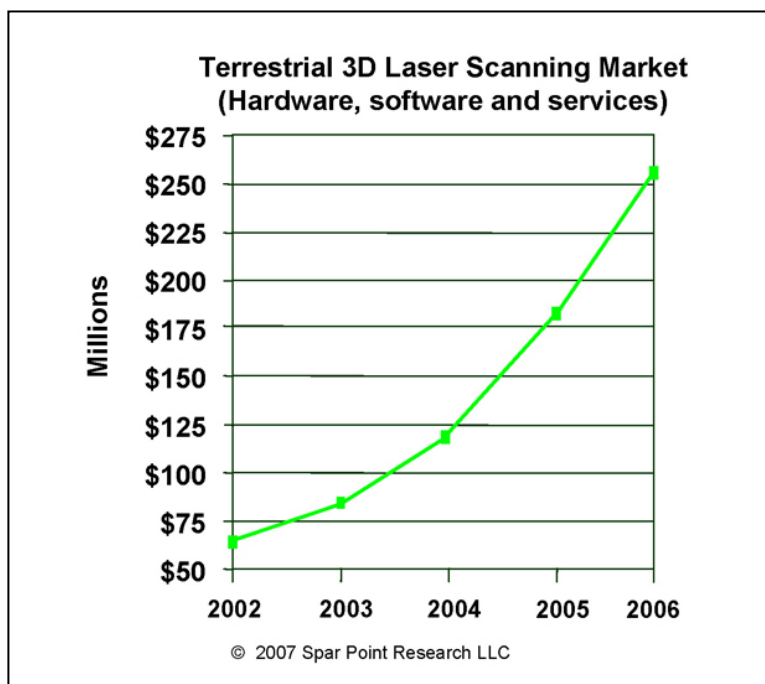
שוק סורקי הלייזר כולל מגוון רחב של סורקים והוא מתאפיין בהתפתחות טכנולוגית הן ברמת החומרה והן ברמת התוכנה. ישנם שלושה סוגים עיקריים של סורקי לייזר קרקעיים המתאימים לביצוע עבודות מדידה ומיפוי והם (כנען ד., טסצ'יאב א. ודגני א., 2003):

- סורק לייזר לטווח קצר של עד 2 מ' המתאים לביצוע מדידה ברזולוציה וברמת דיוק של 0.15-1.5 מ"מ.
- סורק לייזר לטווח בינוני של עד 200 מ' המאפשר ביצוע מדידה ברזולוציה גבוהה וברמת דיוק של 3-5 מ"מ לטווחים של עד 100 מ' וברמת דיוק של 8-12 מ"מ לטווחים של עד 200 מ'.
- סורק לייזר לטווח גבוה של עד 2,000 מ' לביצוע מדידה ברזולוציה נמוכה וברמת דיוק של 20 מ"מ ומעלה.

בציור מס' 3, מוצגים סורקי לייזר של חברות Riegl, Lieca ו-Cyrax. להלן מספר קריטריונים אשר עשויים לסייע בבחירת סורק לייזר (Staiger R., 2007). מישקול הקריטריונים תלוי בשימושים שיעשו בסורק, בכישורים ובניסיון של העובדים שיפעילו את הסורק ועוד. להלן פירוט הקריטריונים:

1. תהליך העבודה: התוכנה הזמינה אשר תשמש לעיבוד נתוני הסריקה והאם היא מתאימה לתהליכי העבודה העכשוויים של המודד ושל צרכניו.
2. דיוק: דיוק ורזולוציית הסריקה.
3. טווח דינמי: מדידה רחוקת טווח בטווחים משתנים של עשרות ומאות מטרים.
4. מהירות: מהירות הסריקה של הסורק ומספר הנקודות שימדדו בשניה.
5. תחום חלון הסריקה: חלון הסריקה משתנה בין הסורקים והוא יכול לנוע בתחום שבין 40*40 מעלות לתחום של 270 מעלות לסריקה אנכית ול-360 מעלות לסריקה אופקית ולחלון סריקה מלא של 360 * 360 מעלות.
6. סביבת הפעלה: עמידות הסורק לעבודה בתנאי שדה (אבק, רטיבות, מזג אוויר...).
7. קלות השימוש: גודלו ומשקלו של הסורק, מקור המתח החשמלי לסורק – משך זמן העבודה והחיות של הסוללה, האם ניתן להפעיל את הסורק ללא מחשב נייד, באיזה תדירות יש לכייל את המכשיר, במה כרוך כיוול הסורק ועוד.
8. אי פגיעה בסביבה האנושית: העבודה עם רוב סורקי הלייזר הקרקעיים אפשרית בסביבה אנושית ללא כל מגבלה, פרט למגבלה שלא להביט ישירות אל הקרן.
9. עלות: עלות סורק היא החל מ-30,000 \$ עד 200,000 \$ כולל תוכנה, תחזוקה, תמיכה ואימון.

בשנת 2006, שוק סורקי הלייזר צמח ב- 43% ביחס לשנת 2005 וסך כל המכירות (סורקי לייזר, תוכנה, חומרה ושירותים) היה בהיקף של 253 מיליון דולר (ראה ציור מס' 4). החברות המובילות בשוק סורקי הלייזר הם: [13.2%], [7.6%] Z + F ו- [5.5%] Optech (Greaves T. and Jenkis B., 2007).



ציור מס' 4: היקף הפעילות של שוק סורקי הלייזר בעולם (2002-2006)

שימוש בסורק לייזר קרקעי לעבודות מדידה – יתרונות וחסרונות

סורק הלייזר הקרקעי הינו כלי מדידה ומיפוי מתקדם, חשוב וחדשני המהווה הדור הבא של מכשירי המדידה. סורק הלייזר מתאים לביצוע כל סוג של מדידה אך אינו מתאים להתוויות ולשירותי ביצוע. טכנולוגיה זו תאפשר את כניסתם של המודדים לתחומי פעילות בהם לא היו מעורבים עד כה ולביצוע עבודות מדידה מורכבות ומדויקות כולל הפקת תוצרי מיפוי איכותיים.

ניתן לקבוע כי שימוש בסורק לייזר קרקעי לעבודות מדידה, מוביל ביחס לשיטות המדידה הקרקעיות המקובלות ובהן המדידה הקוטבית הנקודתית בהתייחס למשך הזמן הנדרש לביצוע המדידה, איכות ודיוק המדידה, איכות ומגוון תוצריה והיחס בין עלות המדידה והעיבוד לתפוקה.

להלן פירוט יתרונות השימוש בסורק לייזר קרקעי לעבודות מדידה:

- מדידה רחוקת טווח ללא רפלקטור המהווה יתרון באתרים בהם קיימת בעיה של נגישות (Waud M., 2004).
- תיעוד מלא ומפורט ברזולוציה מרחבית גבוהה של עד 3 מ"מ.
- מדידה מדויקת ומפורטת של אובייקטים מורכבים.
- מדידה בכל שעות היממה ללא מגבלה של אור.
- מדידה מערכתית "כוללנית" ולא נקודתית כך שהפרט נגזר מהשלם להבדיל משלם הנבנה מאוסף של נקודות בדידות.
- מדידה מערכתית "כוללנית" מבוקרת כך שמתקבל כיסוי מלא של האובייקט/האתר ללא "הזנחה" של פרטים וללא צורך בביצוע סריקות נוספות משלמות ו/או השלמות שדה.
- מדידה מערכתית אוטומטית וממוכנת המקטינה בצורה משמעותית את ההסתברות לטעויות מדידה.
- מדידה מערכתית אוטומטית אשר אינה תלויה באינטרפטציה סובייקטיבית של המודד.
- ענן הנקודות יכול לשמש לעבודות מדידה ומיפוי נוספות ולמתן מענה לדרישות עתידיות של מזמין העבודה.
- מהירות מדידה גבוהה של 120,000 - 1,500 נקודות לשניה ויותר (תלוי בסוג הסורק).
- ויזואליזציה של ענן הנקודות הצפוף כתמונה דיגיטלית. ענן הנקודות הוקטורי והתלת-ממדי כולל בתוכו את "תרשים המדידה" ומאפשר למודד בזמן הסריקה לבקר ולעקוב אחר איכות ושלמות הסריקה. בנוסף, ענן הנקודות מהווה אורתופוטו קרקעי בו כל פרט נמצא במקומו המרחבי הנכון.
- יכולת להוספת אינפורמציה נושאת לענן הנקודות בנוסף לנתוני המיקום (Z, Y, X) ולנתון הצבע.
- מצלמה דיגיטלית מובנת בסורק ובחלק מהסורקים מקלט GPS מובנה.
- מהירות הפקה גבוהה ביחס לתפוקה המתקבלת.
- מדידה עם סורק לייזר קרקעי, מתבצעת בד"כ על ידי עובד אחד.
- את תוצרי הסריקה ניתן לייצא לרוב תוכנות ה-CAD הקיימות וכן לתוכנות ממ"ג ובהן תוכנת ARC/INFO של חברת ESRI.

להלן פירוט חסרונות השימוש בסורק לייזר קרקעי לעבודות מדידה:

- עלות גבוהה יחסית של סורק הלייזר ביחס למכשירי מדידה אחרים, כגון: TOTAL-SATION. עלות סורק היא החל מ- \$ 30,000 עד \$ 200,000 כולל תוכנה, תחזוקה, תמיכה ואימון.

- במקרים מסוימים, נדרשת השקעת זמן רב בעיבוד תוצאות הסריקה. ישנן תפוקות הדורשות יחס של 1:25 - 25 ימי משרד ליום אחד בשדה.
- סורק הלייזר מתאים לביצוע כל סוג של מדידה אך אינו מתאים להתוויות ולשירותי ביצוע.

יש פוטנציאל רב לשימוש בסורק הלייזר הקרקעי בתחום המדידה והמיפוי אשר עדיין לא מוצה (Waud M., 2004). עד כה נמכרו בכל העולם כ-1,500 סורקים לשימושים שונים (מקצתם לתחום המדידה והמיפוי). בישראל נרכשו 4 סורקים – 2 סורקים משמשים גם לצורכי מדידה ומיפוי. השימוש המצומצם בסורקי הלייזר הקרקעיים בחברות המדידה והמיפוי בישראל נובע בעיקר בשל העלות הגבוהה יחסית של סורק הלייזר (כולל תוכנות) זאת ביחס למכשירי מדידה אחרים.

עיבוד תוצאות הסריקה – עיבוד ענן הנקודות

סריקת הלייזר הקרקעית מתבצעת תוך צבירת המידע והצגתו בזמן אמת. תוצר המדידה המיידי המתקבל הינו ענן נקודות וקטורי, תלת-ממדי וצפוף מאוד המתאפיין ברמה גבוהה של ויזואליות. ענן הנקודות מהווה תיעוד מלא, אותנטי ו- Repeatability של האובייקט הנסרק.

שלב עיבוד תוצאות הסריקה הוא המכריע מבחינת השקעת הזמן ואיכות התוצרים. בשלב זה, באה לידי ביטוי הרמה המקצועית ונסיונם של העוסקים במלאכה ובעיקר יכולתם להתאים את התוצרים לצורכי המזמין תוך מניעה מתפוקת יתר. ישנן תפוקות הדורשות יחס של 1:25 (25 ימי משרד ליום אחד בשדה) ויש תפוקות שניתן להפקין ביחס של 1:2. ההבדל הוא משמעותי מכל ההיבטים ולכן יש להקדיש מאמץ רב בהבנת צורכי המזמין כבסיס להצלחת המשימה.

המגמה המסתמנת כיום היא לספק לצרכן כמוצר את קובץ ענן הנקודות המתקבל מסריקת הלייזר הקרקעי, זאת לאחר תהליך עיבוד בסיסי הכולל ניקוי "רעשים" הנובעים מהחזרים אקראיים מגופים סמוכים ובהוספת מידע נושאי. תהליך העיבוד הינו בסיסי והוא אינו כולל עיבוד כרטוגרפי והפקה של תוצרי מיפוי (ספרתיים, קשיחים ואחרים).

חלק מהסורקים נמכרים עם תוכנת עיבוד ואחרים מסתמכים על תוכנות Third Party. קיימת תאימות בין תוכנות רבות לסורקים שונים, כך שבמקרים רבים תוכנת העיבוד נבחרת על פי היישומים הנכללים בה ולא בשל הקשר הספציפי לסורק.

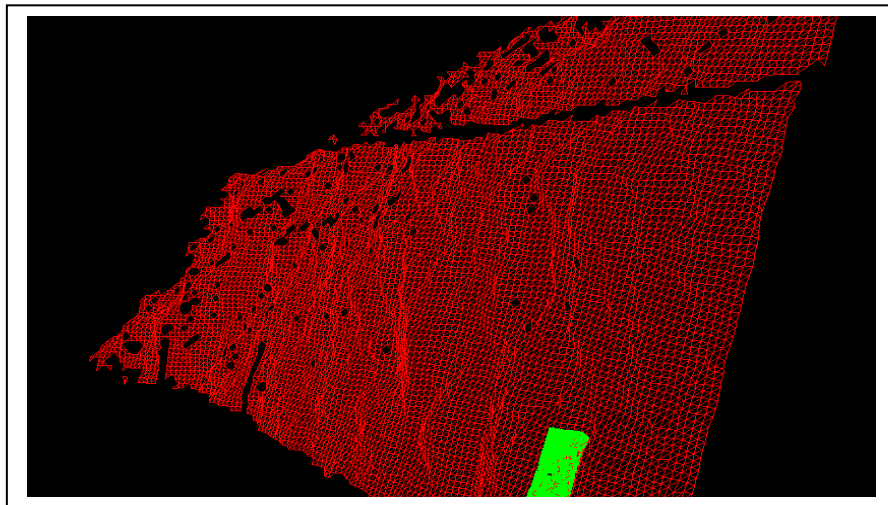
ענן נקודות מטבעו הוא בעל נפח מידע גבוה, הוא אינו רציף וסדור וצפיפותו משתנה. המידע הנשמר עבור כל אחת מהנקודות, כולל 3 קואורדינאטות גיאומטריות, 3 ערכי

צבע טבעי (RGB) ומידע על עוצמת החזר (Intensity Map). ברוב המקרים נשמר הענן בפורמט פרטי של התוכנה האוגרת ומצוי בתצורה שאינה יישות CAD כדי לאפשר מניפולציות בזמן סביר. העברת הנקודות ליישות CAD מקשה מאד על הפעלת רוב התוכנות המצויות היום בשוק. מטבעו, הענן אינו רציף ולכן לא נתן לבצע בו פעולת CAD סטנדרטיות. מצויות תוכנות המנתחות ומתייחסות לענן הנקודות כאל ישות מרחבית ומאפשרות ניתוח התנגשויות וחדירות של גופי CAD אל הענן (Greaves T. 2006).

תהליך עיבוד תוצאות הסריקה כולל את שלושת התחומים העיקריים הבאים:

א. עיבוד בקווי מתאר גוף או מודלים דו-ממדיים

תהליך עיבוד פשוט בו משתמשים בענן הנקודות כבסיס ליצירת מערך פוליגוני מתאר גוף (קונטורים) תלת-ממדיים, תוכניות והיטלים דו-ממדיים, אורתופוטו של ענן הנקודות, חתכים מקומיים, קווי אי רציפות וכד'. עיבוד זה מתאים בד"כ לעבודות שימור אדריכלי, ארכיאולוגיה ובעבודות בהם המרכיב התלת-ממדי פחות חשוב. עיבוד זה מבוצע בד"כ על בסיס היטל של ענן הנקודות על ציר נבחר.



ציור מס' 5: רשת טריאנגולציה על פני מצוק

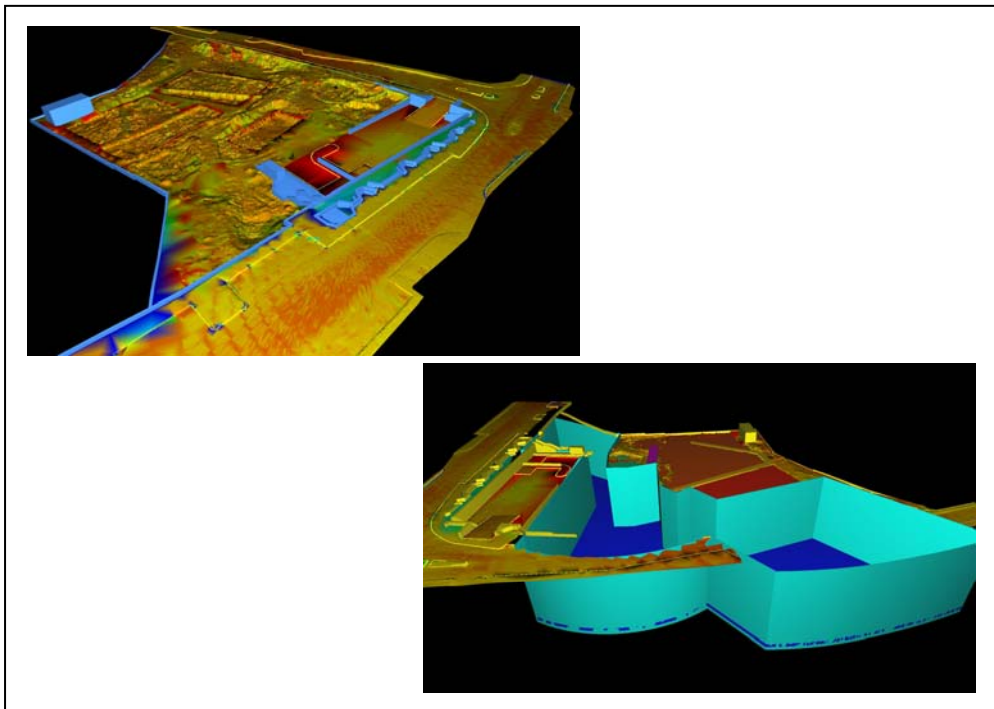
ב. עיבוד תלת-ממדי במשטחים תלת-ממדיים כלליים

תהליך עיבוד המיועד לקבלת מודלים תלת-ממדיים כלליים בגופים שמשטחיהם כלליים במרחב ללא אפיון דטרמיניסטי פרימיטיבי. עיבוד זה מתאים לטופוגרפיה, מידול גופים מורכבי תצורה כמכוניות, מטוסים, כלי שיט, גוף אדם וכל אלמנט מרחבי כללי.

1.2 רשת משולשית - Triangulation Mesh

רשת משולשים הבנויה מחיבור לינארי בין שתי נקודות סמוכות והיא יישות ה-CAD הפרימיטיבית ביותר לתיאור משטחים הנוצרים ע"י ענני נקודות. בד"כ משתמשים ברשתות מסוג TIN וניתן להבחין בין מודל גבהים ספרתי של הקרקע הטיבעית (Digital Terrain Model) DTM, למודל גבהים כללי DSM (Digital Surface Model) (ראה ציור מס' 6) ומודל גבהים ספרתי של גופים ספציפיים.

רשת המשולשים מתאפיינת בכך שאינה מחליקה נגזרות בחיבורי הקווים וכוללת רעשים מסוגים שונים ובהם רעש לבן שאינו מונחת. היא פשוטה לבנייה אך רגישה ביותר לאי רציפות במשטחים ולנקודות חורגות (אקראיות) והיא אינה מטפלת בתנאי שפה גיאומטריים.



ציור מס' 6: מודל גבהים ספרתי מסוג DSM ותכנון תלת-ממדי של חניון בהתבסס על מודל גבהים מסוג DSM

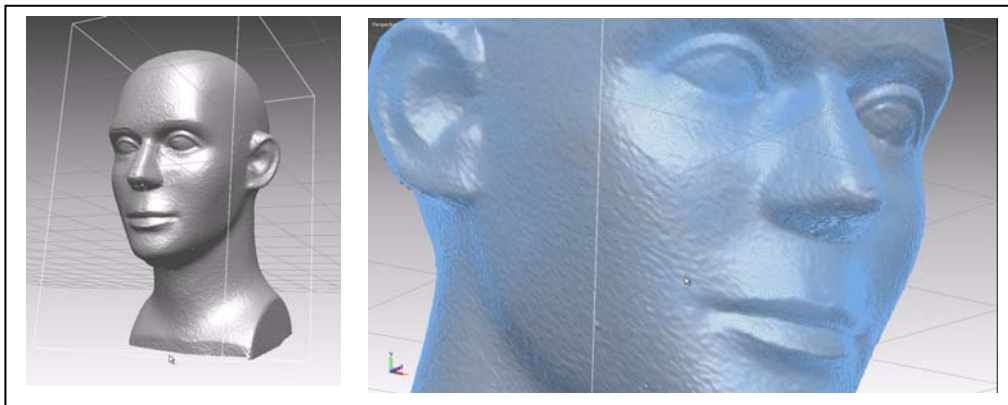
2.2 Resampling

כיוון שרשת משולשית הנה גוף תלת-ממדי רציף (למעט בנקודות ספציפיות) נתן לדגום אותה וליצור אוסף נקודות, בד"כ מופחת, סדור ובעל צפיפות קבועה

ורצוייה. תהליך של דגימה מחדש מתאפשר בתוכנת עיבוד ענני הנקודות, מהווה פילטר מעביר נמוכים (LPF) ומקטין מהותית רעש לבן בתנאי שכמות הנקודות אומנם מופחת. רשת סדורה ושוות צפיפות, נוחה לעבודה בתוכנות CAD ולכן היא אטרקטיבית. מנסיוננו, נתן להגיע לדיוקים גבוהים מאד יחסית לדיוק הנקודתי המוצהר של הסורק, ע"י שילוב בין רשת דגימה מחודשת יחד עם נקודות ריתום גיאומטריות מדוייקות הנרכשות במכשיר מדוייק.

3.ב. משטחים תלת ממדיים מוחלקים NURBS (Non Uniform Rational Bi-Splines)

עיבוד המיועד לקבלת משטחי CAD או גופי Solid תלת-ממדיים מוחלקים של גוף כלשהו (ראה ציור מס' 7). כל ארבע נקודות סמוכות מייצרות משטח תלת-ממדי כאשר בכל נקודת צומת הנגזרות בכל כיוון מתאפסות ובכך מוחלק הגוף. ניתן גם לייצר משטח יחיד רב פרמטרי לכיסויי גוף מורכב ומוכלל. המשטח המתקבל יכול להיות בעל תכונות CAD של קליפה (Shell) בעלת מימד עובי קטן מאד יחסית לשני הממדים האחרים או גוף קשיח – Solid. משטחים כאלה רגישים לרעש מדידה ועדיף שיהיה קטן מ- 15%-20% של גודל המאפיין את האלמנט. בעיבוד מסוג זה מטפלים באפקטי שפה, באי שלמות גיאומטרית, בחורים במעטפת הגוף וכד'. משטחי כאלה מחייבים בדרך כלל שפה סדורה וברורה, משטחים מונוטוניים ללא חורים וללא קווי אי רציפות של המשטח.



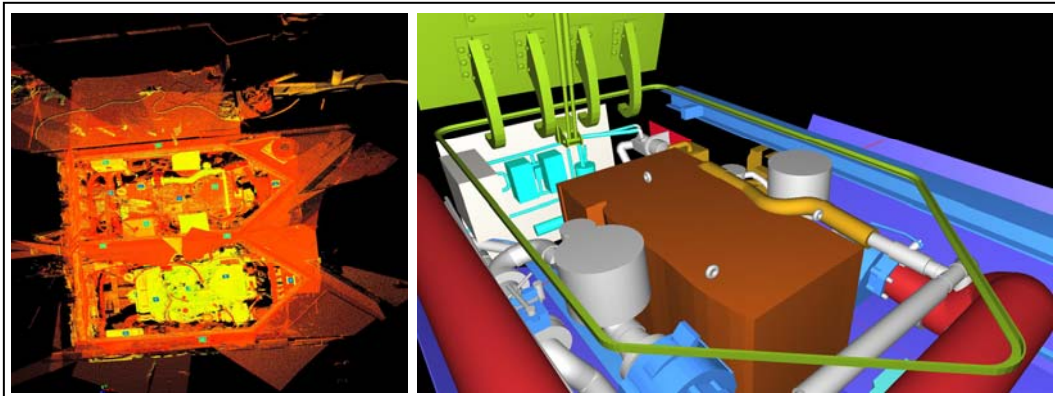
ציור מס' 7: מודל תלת-ממדי מוחלק מסוג NURBS (ימין) בהתבסס על ענן נקודות (שמאל)

ג. מידול תלת-ממדי של גופים פרימיטיביים

כאשר עוסקים בגופים הנדסיים פרימיטיביים ודטרמיניסטים (כדור, מישור, גליל, תיבה, קונוס, פריזמות וכד') או רכיבים תעשייתיים סטנדרטיים (קורות, צנרת, מגופים, מחברים וכו') ניתן להתבסס על ענן הנקודות שלהם ולבנות ממנו מודל תלת-ממדי המבוסס על התאמה מיטבית (Best Fit) בין ענן הנקודות למבנה ההנדסי. התהליך סטטיסטי ובנוי על ריבוי פתרונות-גליל, למשל, אינו נמדד ע"י 3-4 נקודות אלא אלפים רבים. המודל מתקבל עם תכונות CAD מתאימות: מיקום וכיוון במרחב, גודל פיזיקלי, שיכבת שירטוט, צבע, כינוי לפי סטנדרד אם יש וכו'. כן מתקבל איפיון סטטיסטי על מידת ההתאמה בין הענן לגוף ההנדסי המדובר: גודל אופייני מייצג, סטיית תקן שלו, שגיאה ממוצעת ושגיאה מירבית בשדה. פרמטרים אלה מאפשרים למעבד לנתח את טיב ההתאמה ולשנות אם צריך. כך נבנה מודל תלת-ממדי שלם של הגוף לפרטיו (ככל שנסרקו) ומתאפשרת כל פעולת CAD (ראה ציור מס' 8).

עיקר עבודתנו בעיבוד הנתונים נעשית בתכנת הסורק Cyclone המאפשרת טיפול בענני נקודות גדולים (350MB) וביצוע תהליכים כגון: מדידות בתוך ענן הנקודות, בניית רשתות משולשים, חתכים, קווי גובה, חישובי כמויות, אנליזות.

גישת עיבוד זו מתאימה ליישומים ספציפיים ואינה כללית כמובן. היא גם אינה נפוצה במרבית תוכנות עיבוד ענני הנקודות. טיפול כזה הוא בדרך כלל צרכן זמן מסיבי ומייקר מאד תהליך עבודה. הגופים התלת-ממדיים המיוצרים כך שיועברו לתוכנות CAD אחרות ויוכרו באופן מלא על ידן.



ציור מס' 8: תא מנועים של ספינה – ענן הנקודות ומודל תלת-ממדי

ד. עיבוד אוטומטי

תהליכי עיבוד מידול אוטומטיים הם משאת נפש מובנת, אך הם עדיין רחוקים מיישום מעשי וקל. כדי לאפשר אוטומציה נדרש לבודד את הגוף מסביבתו ולנקות נקודות בלתי רצויות הנובעות מהחזרים אקראיים או מהחזרים מגופים סמוכים.

ברוב התוכנות מצויים היום מנגנונים לאיתור אוטומטי של קווי אי רציפות אך האלגוריתמים עדיין רגישים ויש לבדקם ולהנחותם על כיוון קו אי הרציפות. מצויים מנגנונים אוטומטיים גם למידול Best Fit של גופים פרימיטיביים אך גם שם היתרון מוגבל: יש לבדוד גופים, חדירות אינן מטופלות, טעויות מחייבות בקרה וכד'. קיימים פילטרים אוטומטיים לפעולה בשדה כולו אך גם הם רגישים לאי רציפות משטחית, קווי שפה, רעש וכד'.

יישום טכנולוגיית סריקת הלייזר הקרקעית לשימור ולשיקום ארכיטקטוני

מדידות לצורך שימור ושיקום מבנים מחייבות מדידה מפורטת ומדויקת של המבנה, חזיתות המבנה כולל מדידה מדוקדקת של אלמנטים ארכיטקטוניים ודקורטיביים (קשתות, דלתות, חלונות, עמודים, ריצוף ועוד). בנוסף, נדרש עיבוד ממוחשב של נתוני המדידה בעזרת תוכנת CAD והפקת תוצרים הכוללים מיפוי מפורט בקני"מ גדול, מודל תלת-ממדי של המבנה, חתכים אנכיים, תכניות תנוחה של כל הקומות ועוד.

השיטות המקובלות כיום לביצוע מדידות לצורך שימור ושיקום מבנים, כוללות:

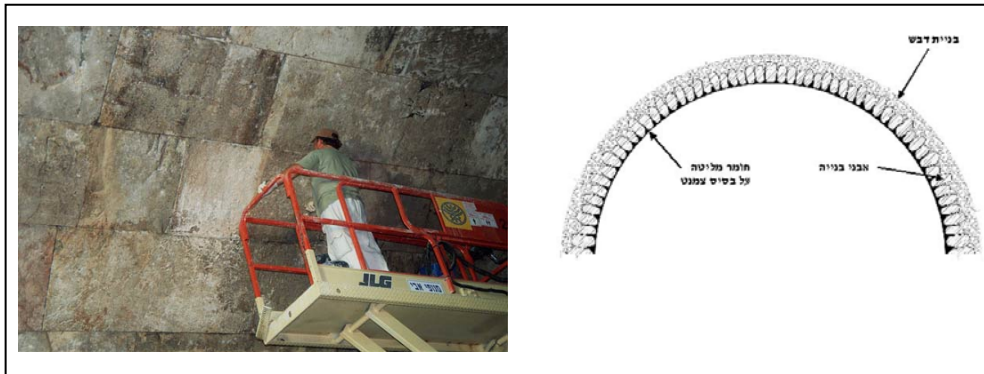
- מדידה קוטבית מרחבית ונקודתית עם מד טווח לייזר (ללא פריזמה) בשילוב מדידות שדה בשיטות קונבנציונליות (סרטי מדידה, TOTAL-STATION).
- מדידה פוטוגרמטרית קרקעית בשילוב מדידות שדה בשיטות קונבנציונליות.

יישום שיטות מדידה אלה כולל הקמת ומדידת רשת תחנות בקרה. היתרון העיקרי של העבודה עם מד טווח לייזר (ללא פריזמה) היא ביכולת למדוד ולקבוע את מיקומו במרחב של כל פרט. החסרון העיקרי הוא בביצוע מדידה נקודתית של נקודות אופייניות כך שאין תיעוד מלא של כל המבנה. בשנים האחרונות, נפוץ מאוד שימוש בתמונות דיגיטליות מוגדלות המחליפות את תרשימי המדידה והמאפשרים ניהול ומעקב אחר עבודת המדידה.

בשנים האחרונות, מיושמת טכנולוגיית סריקת הלייזר הקרקעית בפרויקטים של שימור ושיקום ארכיטקטוני. מדידה עם סורק לייזר קרקעי מאפשרת תיעוד מלא, מפורט ומדויק של המבנה בכללותו, חזיתות המבנה, אלמנטים דקורטיביים ואחרים.

חברת מבט הייתה מעורבת בפרויקטי שימור ושיקום ארכיטקטוני בהם פרויקט שימור קשת וילנסון שבמנהרות הכותל (ראה ציור מס' 9) (Jenkins B., 2006). לשם בחינת היציבות ההנדסית של הקימרון של קשת וילסון, בוצעה על ידי חברת מבט סריקה קרקעית של הקימרון ושל פני השטח ונבנה מודל תלת-ממדי של הקימרון. מודל זה נמדד אל מול מודל גיאומטרי בצורת חצי חרוט לבחינת עיוותים הנדסיים. במדידה זו נמצא כי הצד הצפוני של הקימרון נמוך מצדו הדרומי בכ- 10 ס"מ, אולם לא נמצאו שקיעות

ועיוותים אשר יכולים ללמד על פגיעה ביציבות המבנה. כמו כן תועדו נזילות באזור הקימרון והתגבשות מלחים על פני אבני הקימרון לא נמצאו סדקים או רווחים חריגים במשקים שבין אבני הבנייה.



צילום מס' 9: עבודות שימור בקשת וילסון וחתך טכנולוגי של הקשת

מיפוי והדמיה סביבתית תלת-ממדית מנתוני סריקת לייזר לעידוד מעורבות

הציבור בתהליך התכנון

תוצרי המיפוי בימינו כוללים בנוסף למפות הנייר ולמפות הממוחשבות הדו-ממדיות המקובלות גם מיפוי תלת-ממדי, מודלים תלת-ממדיים, הדמיות, וידאו ועוד. מידול תלת-ממדי מהווה אמצעי ויזואלי להמחשה ולהדמיה בפרויקטים רבים בתחומים שונים. המידול התלת-ממדי וההדמיה הממוחשבת תורמים להבנה מלאה של תופעות ומסייעים לכל הגורמים המעורבים בפרויקט להתגבר על מגבלות של תפיסה וייצוג של הסביבה במפות ותכניות ובמיוחד להתגבר על הקושי של טרנספורמציה של המרחב הדו-ממדי למרחב התלת-ממדי.

בשנים האחרונות, במסגרת עידוד מעורבות הציבור בתהליך התכנון, מקובל יותר ויותר לבצע מידול תלת-ממדי של פרויקטי תכנון להמחשת היבטים שונים של התכנון ושל החלופות השונות המוצעות. עקרון מנחה - טכנולוגיית המידע הגיאוגרפי הסביבתי בכלל והמידול התלת-ממדי ההדמיתי בפרט עשויים לשפר את יכולת ההבנה של הציבור את תוצרי התכנון ולעודד את מעורבות הציבור בתהליך התכנון כבר בצעדיו הראשונים. מידול תלת-ממדי של מידע תכנוני וסביבתי, יאפשר לציבור הרחב לראות במידע זה כסביבה מוכרת קלה להתמצאות, להבנה ולהתייחסות. מידול תלת-ממדי כולל סימולציות תסייע לציבור להבין ולגבש עמדה לגבי חלופות תכנוניות מוצעות.

יש לציין כי נעשה שימוש במידול תלת-ממדי גם בבתי משפט - בג"צ בית סוריק בנושא גדר ההפרדה. בשל הצורך הבולט בהמחשת תוואי גדר ההפרדה בבית המשפט העליון, נערכו התובעים להפיק מודל תלת-ממדי להמחשת ההשלכות ולניתוח התוואים השונים המוצעים על ידי הצבא.

שימוש בסורק לייזר קרקעי לרישום תלת-ממדי ורב-שכבתי של מקרקעין

(קדסטר תלת-ממדי)

מערכת הקדסטר הקיימת בישראל אינה מתאימה למציאות ההנדסית המרחבית המתהווה בעשורים האחרונים וזאת בשל היותה קרקעית ודו-ממדית. מרשם המקרקעין הקיים, מספק תמונה דו-ממדית של גבולות המקרקעין כאשר יחידת הקרקע היסודית היא חלקה. בשל השימוש האינטנסיבי בקרקע, בעיקר במרכזה של הארץ ובמרכזי הערים הגדולות ובשל היתרונות הרבים של הבניה בתת-הקרקע, קיים צורך הולך וגובר בניצול מרחב תת-הקרקע. על מנת לאפשר את המשך הקמתם של פרויקטים הנדסיים תת-קרקעיים (ועל-קרקעיים), וכדי לאפשר את רישום של נכסים שאינם קרקעיים, יש להגדיר מודל קדסטרי חדש תלת-ממדי מרחבי שהיינו רב-שכבתי. במקביל לכך, יש לבצע שינויי חקיקה כך שהחוק יאפשר לראות במרחבים התת-קרקעיים והעל-קרקעיים חטיבות נפרדות לזכויות ולעסקאות.

בשנת 1999 ובשנת 2000 נתקבלו שתי החלטות ממשלה בנושא ייעול השימוש בקרקע (החלטה מס' 144/99 והחלטה מס' 2216/00), מהן משתקף עניינה של הממשלה בנושא הקדסטר התלת-ממדי והמרחבי. על פי החלטות אלו יש להסדיר את התנאים אשר יאפשרו ניצול מתחם קרקע למספר שימושים, בבעלויות נפרדות, מעל פני השטח ומתחתיו. משרדי הממשלה והגופים המוסמכים וביניהם המרכז למיפוי ישראל נדרשו לגבש פתרונות לבעיות הנגזרות מהחלטה זו.

הערכות לקדסטר תלת-ממדי במרכז למיפוי ישראל החלה כבר לפני כ-8 שנים. במהלך השנים 2002-2004, המרכז למיפוי ישראל הוביל פרויקט מחקר ופיתוח בנושא של רישום תלת-ממדי ומרחבי של זכויות קניין. במסגרת פרויקט המו"פ גובש פתרון מעשי לרישום זכויות קניין בתת-הקרקע ובעל-הקרקע, הכולל תיחומן של תת-חלקות מרחביות וחלקות מרחביות המרובדות אנכית והמוגדרות בתת-הקרקע ובעל-הקרקע.

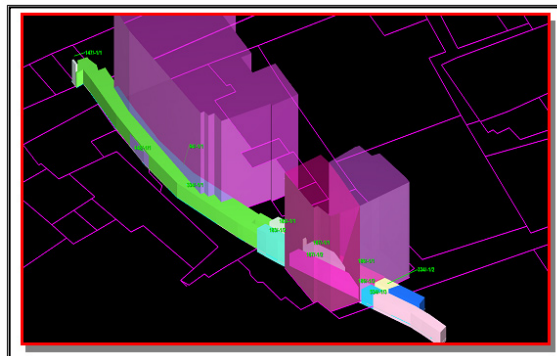
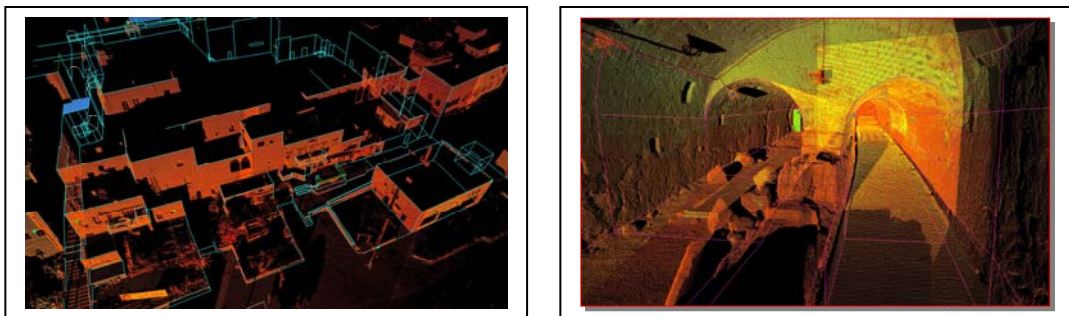
במציאות הקדסטריה החדשה, המרחבית והרב-שכבתית, תיחומן של חלקות קרקעיות, תת-חלקות מרחביות וחלקות מרחביות המרובדות אנכית מחייב הגדרה תלת-ממדית. הגדרה שכזו, כוללת נתונים המגדירים את מיקום העצמים והחלקות במרחב, כולל הגבול האופקי והאנכי שבין יחידות קניין אלה. יכולת להציג באופן ויזואלי ברור מאפיינים תלת-ממדיים של חלקות מקרקעין, תאפשר להגדיר בצורה טובה יותר את החלוקה

הקדסטרלית המרחבית (Benhamu M. and Doytsher Y., 2003). תצוגה תלת-ממדית משוכללת תספק גם כלים טובים יותר לבדיקה ולניתוח המידע שהוצג עד כה באמצעות תצוגה דו-ממדית.

שיטות וטכנולוגיות המדידה הקיימות נוסו במספר פרויקטי ניסוי שבוצעו במסגרת פרויקט מו"פ קדסטר תלת-ממדי ולאחריו ונמצאו ישימות גם לקדסטר המרחבי (Shoshani U., Benhamu M., Goshen E., Denekamp S. and Bar R., 2004). נבדקו מכשירי המדידה ושיטות המדידה כמפורט להלן :

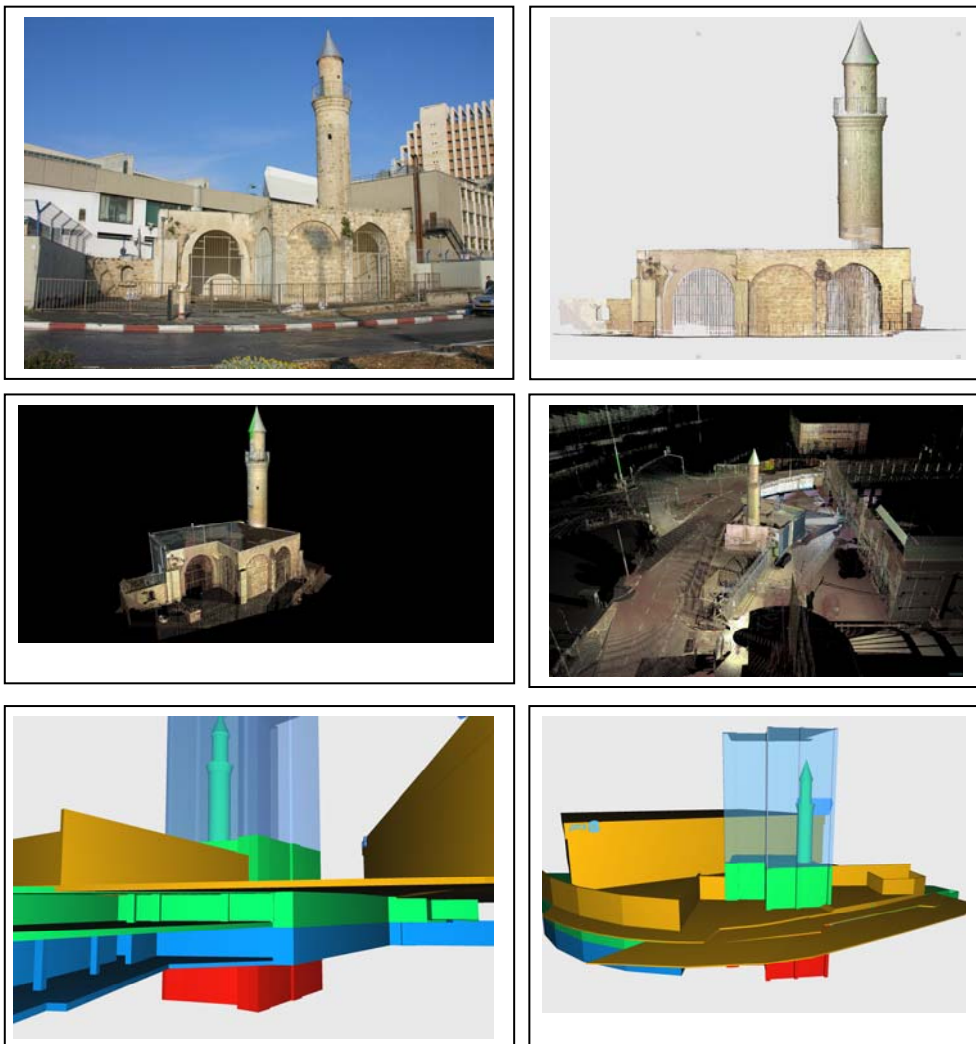
- מדידה קוטבית תלת-ממדית של פרטים בתת-הקרקע ועל פני הקרקע, באמצעות "תחנה כוללת" עם פריזמה (רפלקטור).
- מדידה קוטבית תלת-ממדית של פרטים בתת-הקרקע ועל פני הקרקע, באמצעות "תחנה כוללת" מופעלת לייזר ללא פריזמה.
- מדידה קוטבית תלת-ממדית של פרטים בתת-הקרקע ועל פני הקרקע, באמצעות סורק לייזר ממוחשב.

יש לציין, כי כל המדידות שבוצעו במיכשור המדידה השונה ובשיטות המדידה השונות עמדו בתקנות המודדים ובדיוקים הנדרשים בתקנות אלה ואף יותר. הוכח שאין כל בעיה בביצוע של מדידה מדויקת בתלת-ממד בתת-הקרקע למדידה (לרוב פנימית) של עצמים פיסיים מרחביים.



ציור מס' 10 : מנהרת הטמפלרים בעכו העתיקה – סריקת לייזר של המנהרה ושל המבנים הקרקעיים הקיימים מעל המנהרה ומודל תלת-ממדי של תת-החלקות המרחביות של מנהרת הטמפלרים על רקע החלוקה הקדסטרית הקרקעית

טכנולוגיית סריקת הלייזר הקרקעית יושמה בשני פרויקטי ניסוי, הן ברישום מנהרת הטמפלרים והאולמות שנחשפו מתחת לכנסיית סנט-אנדריאס בעכו העתיקה (ראה ציור מס' 10) והן ברישום תלת-ממדי של מסגד בחיפה (ראה ציור מס' 11). במסגרת פרויקטי ניסוי אלה באו לידי ביטוי יתרונותיה של טכנולוגיה זו ובהם היתרונות הבאים: מדידה מדויקת ומפורטת, תיעוד מלא ומפורט ברזולוציה מרחבית של עד 3 מ"מ, ביצוע מדידה מרחבית רחוקת טווח ללא רפלקטור במקומות בהם היתה בעיה קשה של נגישות, מדידה מהירה שבוצעה על ידי צוות מצומצם, תפוקה רבה הכוללת מגוון מאוד רחב של תוצרי מיפוי כולל מודלים תלת-ממדיים רב-שכבתיים של האתרים השונים, ענן הנקודות איפשר מתן מענה לשאלות שעלו בשלב עיבוד הנתונים ללא צורך ביציאה לשטח ועוד.



ציור מס' 11: המסגד בעיר חיפה – סריקת לייזר של המסגד וסביבתו ומודל תלת-ממדי של המסגד כולל החלוקה לתת-חלקות מרחביות

סיכום

ההתפתחות הטכנולוגית המהירה של מכשירי ושיטות המדידה, צמצמה בצורה גורפת את התלות במיומנתו של המודד. מכשירי המדידה החדשניים של היום מאפשרים את תחילת התהוותה של מגמה לפיה נתוני מדידה ומיפוי מסופקים לצרכנים שלא על ידי מודדים מוסמכים. ככל שטכנולוגית המדידה תהיה פשוטה וקלה לביצוע, יוכל הצרכן לבצע את המדידה בעצמו ולא להזדקק לשירותיו של המודד.

בעולם, מיושמת טכנולוגית סריקת הלייזר הקרקעית בתחומי עיסוק ופעילות רבים כך שחלקו של תחום המדידות קטן יחסית.

על ציבור המודדים, לאמץ טכנולוגיות מדידה חדשות ומשופרות ובהם סורק הלייזר הקרקעי. על המודדים להבין את הצרכים המשתנים של צרכניהם ושל תעשיית המידע המרחבי. על המודדים להשכיל לספק נתונים מרחביים בכל רמת דיוק ולספק תוצרי מיפוי חדשניים הכל בהתאם לצרכים של הצרכנים.

סורק הלייזר הקרקעי הינו כלי מדידה ומיפוי מתקדם וחשוב, המתאים לביצוע כל סוג של מדידה ומבחינת הדור הבא של מכשירי המדידה. טכנולוגיה זו תאפשר את כניסתם של המודדים לתחומי פעילות בהם לא היו מעורבים עד כה ולביצוע עבודות מדידה מורכבות ומדויקות.

מקורות:

כנען ד., טסצ'יאב א. ודגני א., 2003. תיעוד, מיפוי ואנליזה גיאומטרית במבנים ומערכות על ידי סריקת לייזר תלת-ממדית – סקירה. יום עיון עיפח"מ 2003.

Benhamu M. and Doytsher Y., 2003: **Toward a Spatial 3D Cadastral in Israel**. In: Computers, Environment and Urban Systems, Vol. 27, pp. 359-374.

Chow K. L., 2007: **Engineering Survey Applications of Terrestrial Laser Scanner in Highways Department of the Government of Hong Kong Special Administration Region**. In: Proceedings of FIG working week, Hong-Kong, May 2007.

Jenkis B., 2006: **Jerusalem's Temple Mount: Historic Preservation with 3D Laser Scanning**. In: Spar Point Research, Article Archive, Volume 4.

Jenkis B., 2006: **3D Laser Scanning for Urban Modeling**. In: Spar Point Research, Article Archive, Volume 4.

Greaves T. and Jenkis B., 2007: **3D Laser Scanning Market Red Hot: 2006 Industry Revenues 253\$ Million, 43% Growth**. In: Spar Point Research, Article Archive, Volume 5.

Greaves T. 2006: **How Much CAD Modeling is Needed for Point Cloud Data?**. In: Spar Point Research, Article Archive, Volume 4.

Shoshani U., Benhamu M., Goshen E., Denekamp S. and Bar R., 2004: **Registration of Cadastral Spatial Rights in Israel - a Research and Development Projects**. In: Proceedings of FIG working week, Athens, Greece, May 2004.

Staiger R., 2007: **Selection Criteria for Terrestrial Laser Scanners**. In: Proceedings of FIG working week, Hong-Kong, May 2007.

Waud M., 2004: **Terrestrial Laser Scanning**. In: Proceedings of ISPRS working week, Istanbul, 2004.