

# הדמיית חפיר המצור בתל אל-צאפיל\ גת באמצעות רדאר חודר קרקע (GPR): מקרה מחקר בארכיאולוגיה גיאופיזיקה

ג'סי פנקוס

המחלקה ללימודי ארץ-ישראל וארכיאולוגיה ע"ש מרטין (זוס)  
אוניברסיטת בר-אילן

רדאר חודר קרקע (GPR) היא טכניקה של חישה מרחוק שבה מוקרנים לקרקע גלים אלקטרומגנטיים מאנטנה, מהקרקע חוזרים גלים ומציגים אלמנטים (Features) תת-קרקעיים. השימוש בטכניקה זו של חישה מרחוק לצרכים ארכיאולוגיים נעשה מזה למעלה משלושים שנה ליישומים שונים ועם תוצאות שונות ומגוונות. על מנת ששילובן של שיטות גיאופיזיות בארכיאולוגיה יהיה פורה דרוש שיתוף פעולה הדוק בין הגיאופיזיקאי לבין הארכיאולוג. להלן נציג בקצרה את הטכנולוגיה ואת יישומיה יחד עם קווים מנחים להשלמת סקר שדה ארכיאולוגי גיאופיזי מקצועי שתוצאותיו יהיו שימושיות לארכיאולוג בשדה. מקרה המבחן שיתואר נעשה בהקשר לחקר חפיר המצור מתקופת הברזל בתל אל-צאפילגת.

## מבוא

רדאר חודר קרקע (GPR) הוא טכנולוגיה של חישה מרחוק המופעלת ע"י הקרנת גלי רדאר (סוג של אנרגיה אלקטרומגנטית) אל תוך הקרקע, מתוך אנטנה הנמצאת בפני השטח. חלק מן הגלים חוזרים אל פני הקרקע לאחר ש"פגעו" בממשק שבין שני חומרים או מבנים תת-קרקעיים. לאחר מכן נקלטים הגלים החוזרים על ידי האנטנה שבפני השטח [4]. הממשקים שמתחת לפני הקרקע מתגלים באמצעות שינויים במוליכות החשמלית של המשקע או של הקרקע, שינויים בתכולת המים שבחומר, שינויים בצפיפות נפח הסטריגראפיה הארכיאולוגית והגיאולוגית, או בהימצאותם של חללים תת קרקעיים כגון קברים, תעלות או בורות [4]. עם התפשטותם של גלי הרדאר בתת-הקרקע בתדר מסוים, מתועד פרק הזמן שחלף למן השידור הראשוני ועד להופעת הגל על פני הקרקע. הגלים החוזרים משודרים במהירות שונה, בהתאם למוליכות החשמלית של החומרים השונים שדרכם הם עוברים. הדרך שעושים הגלים המשודרים מן האנטנה לשכבה שבתת-הקרקע וממנה בחזרה אל פני הקרקע נמדדת בזמן, שהוא סך הזמן שעובר כל גל במסלול זה. השילוב שבין המסלול הדו-כיווני ומהירות הגל החוזר משמש לחישוב העומק שבו ממוקמים הממשקים השונים או אובייקטים אחרים בעומק [4]. בסקר GPR משתמשים באנטנות בתדרים שונים בהתאם למטרות הסקר ולתנאי הקרקע. אנטנות בתדר נמוך (10 – 250 מגהרץ) הן ברזולוציה נמוכה, והן מסוגלות להבחין באובייקטים גדולים כגון קירות ויסודות של מבנים. הגלים מאנטנות כאלו יכולים לחדור עד לעומק של כ-50 מטר. בדרך כלל אנטנות אלה הן גדולות בממדיהן הפיסיים. אנטנות בתדר גבוה (למשל, 300 - 1500 מגהרץ) הן ברזולוציה גבוהה ובמקרים מסוימים יכולות לאתר אובייקטים שגודלם

סנטימטרים בודדים בלבד (ולכן שימושיות מאוד לארכיאולוגים). יכולת החדירה שלהן רדודה ויכולה להגיע לעומק 1 – 5 מטר. בדרך כלל, אנטנות אלה קטנות בממדיהן הפיסיים.

### כיצד השתמשו ברדאר חודר קרקע GPR?

ה-GPR החל לשרת את הארכיאולוגיה כבר באמצע שנות השבעים (של המאה ה-20) ושימש לאיתור קירות של ממוגורות, חומות אבנים, או מרתפי אחסון תת-קרקעיים באתרים היסטוריים [4]. התוצאות המבטיחות של ה-GPR בשלבים המוקדמים דרבנו את הארכיאולוגים להשתמש בטכנולוגיה זו ליישומים נוספים. כיום משתמשים ב-GPR לצורך הדמיה ואיתור של ממצאים ארכיאולוגיים כגון רצפת בית שנקברה באדמה, קברים, מטמונים, בורות ומערות רדודות [3, 4, 8]. יתרון חשוב נוסף בשימוש ב-GPR לארכיאולוגיה הוא העובדה שלאחר מיפוי בעזרת GPR של שטח נרחב לפני החפירה, ניתן לקבל תמונה של מקומות פוטנציאליים לחפירה, ובכך לחסוך זמן והוצאות [4, 8].

### יישומיה של שיטת ה-GPR

כמו בכל טכנולוגיה, שימוש נכון וטכניקה נכונה הנם חיוניים להשגת תוצאות משמעותיות. ניסונה של כותבת המאמר מלמד שקשר הדוק בין הארכיאולוג לבין הצוות הגיאופיזי הם הדבר החיוני ביותר. ככל שכל קבוצה תשכיל להבין טוב יותר את מטרות הקבוצה השנייה, כך יושג תכנון אסטרטגי טוב יותר באתר. הגיאולוגיה של האתר, הארכיאולוגיה ושיטות הבנייה (בעבר ובהווה) באתר, וכן הנחות היסוד של הארכיאולוג – כל אלה מספקים נתונים חשובים, ויתרמו להשגת תוצאות טובות יותר בסקר ה-GPR באתר.

על מנת שהסקר הגיאופיזי ותוצאותיו יהיו אפקטיביים לארכיאולוג יש לפעול כדלקמן:

1. להחליט מהו השטח שבו נדרש סקר ולדעת למקד את הסקר ולהעריך מה אתה מצפה למקווה לגלות בתת-הקרקע;
2. לפנות מהאזור המיועד לסקר מסלעים, שיחים, וכיו"ב על מנת ליצור שטח חלק שעליו יעברו האנטנות;
3. לתחום את רשת הריבועים (grid) ולתעד בכתב ובאמצעות תצלומים את האזור כדי לקבוע אילו אובייקטים (למשל, כלי רכב, עצים או סלעים) לא ניתן להסיר מן השטח המיועד להיסקר;
4. להשלים ניתוח עומק ומבחני כיוול המרחקים (distance calibration tests) באתר על מנת שתהיה אחידות וקוהרנטיות בנתוני ה-GPR מבחינת המרחקים שבין קווי האורך והרוחב ברשת;
5. לסקר ביסודיות את האזור המתוחם באמצעות ה-GPR;
6. לקחת בחשבון הפרעות אלקטרומגנטיות באזור (כגון רדאר, מכשירי קשר, וכו');;
7. להעביר את הנתונים מן השדה אל המעבדה לשם ביקורת לאחר העיבוד והדמיה ממוחשבת – בשלב זה מופקים מפות ונתונים מספריים חשובים ושימושיים;

8. יש לחבר דו"ח המסכם את הפעולות שננקטו, מסביר את התוצאות, נותן מענה לשאלות וכולל המלצות לפעולות נוספות בעתיד שיועילו לחופר.

#### **יישומם של הקווים המנחים – מה נעשה עד כה בתל אל-צאפיל' גת**

פרוייקט החפירות בתל צפית/גת החל בשנת 1996. מאז נחשפו שרידים מתקופות שונות, ובמיוחד מהתרבות הפלשתית של תקופת הברזל. כבר ב- 2003 ובהמשך גם בקיץ 2004 ערך צוות של חברת Mnemotrix Systems, Inc את סקר ה-GPR והמשיך לחשוף ולאתר את שרידיה של חפיר המצור שמסביב לאתר. החופרים משערים שמערכת מצור זו נבנתה בסוף בתקופת הברזל II א, ואולי קשורה לחורבנה של גת פלשתים על ידי חזאל מלך ארם (מלכים ב' יב: 18; ראה [3]). אורכה של תעלה זו מעל ל-2 ק"מ, והיא מקיפה את האתר ממזרח, מדרום וממערב [6,1]. היות והחפיר מקיף את האתר משלשה כיוונים, חופר האתר שיער שבצלע הרביעי (הצפוני) ניצלו את התעלה הטבעית של ערוץ נחל האלה (כדי ליצור סגירה מכל הכיוונים). אך בפועל, לא נמצאו שרידים על פני השטח של החיבור בין החפירה לבין ערוץ הנחל. השטח שערך בו סקר ה-GPR היה באזור ששיערו ששם קיים החיבור בין שני אלמנטים אלו.

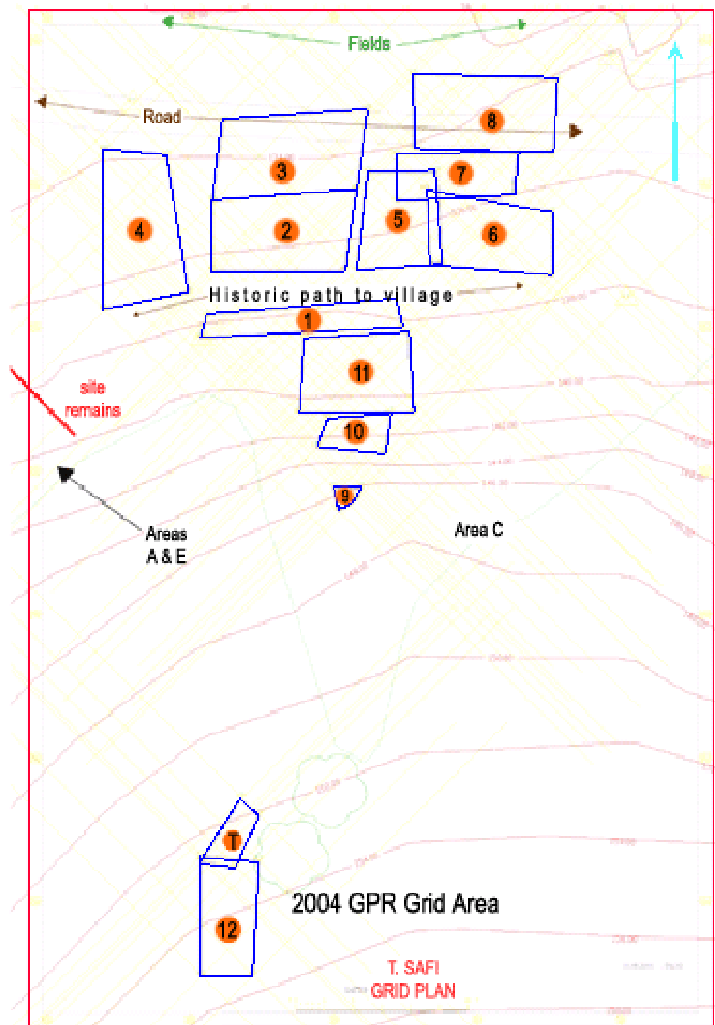
שטח בגודל של 75 מ"ר לערך, נסקר באמצעות GPR ב-11 רשתות (grids) נפרדות הסמוכות זו לזו בעלות קווי רוחב מקבילים ב-GPR, ובנוסף, רשת ביקורת (control study) grid מס' 12 שנסקרה בסמוך לתעלה שכבר נחפרה באזור C6. רשתות אלה הוכנסו לתוך רשת-על, Super 3D, שכוללת את צלע הגבעה הנוטה לכיוון השדות המעובדים כיום שמצפון. האזור שבו בחרנו לעבוד, על פי הנחייתו של מנהל הפרוייקט, ד"ר אהרן מאיר, יוצר שיפוע מתון כלפי מעלה בכיוון דרום, אך תלול בסמוך לאזור C, כפי שניתן לראות בתרשים 1.

כאמור לעיל, כשאוספים נתונים לרשת ה-GPR, השטח צריך להיות שטוח וישר ככל שניתן. כל האזורים נקו משיחים קוצניים ומאבנים בטרם הוחל באיסוף הנתונים לרשת הריבועים. יש להביא בחשבון ולתעד גם את נתוני הגובה (elevation data) בשטח הנסקר.



תרשים 1 : מבט מן האוויר על חפיר המצור בתל אל-צאפי/גת מצד דרום - דרום-מערב. באדיבות פרוייקט החפירות בתל אל-צאפי/גת.

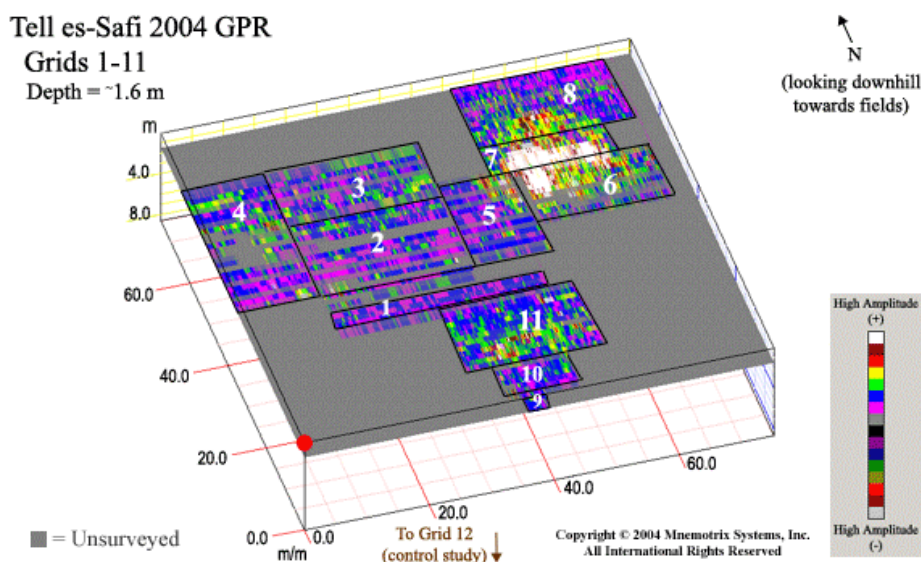
בתחילת סקר ה-GPR, נתחם שטח נרחב שבו על פי ההשערה עובר המשך תוואי תעלת המצור, בהסתמך על מידע ארכיאולוגי וסביבתי שהיה נתון. תרשים 2 הוא מפה של אזור GPR משנת 2004 המראה את מיקומה של הרשת שלנו תוך שימוש במכשיר GPS שמתעד את נקודות הקצה שלנו. תרשים 3 הוא מפה סכמטית של רשתות ה-GPR כפי שמיקמנו אותן בשטח.



2004 Map of Tell es-Safi/Gath Archaeological Project Provided Courtesy of Surveyor Yehuda Shapiro.  
GPR diagram and labels provided by Mnemotrix Systems, Inc.

תרשים 2: מראה מלמעלה של אזור GPR 2004. גרסה בגודל מלא ניתן לראות ב:

<http://www.mnemotrix.com/geo/essafi/trench/safi04.pdf>

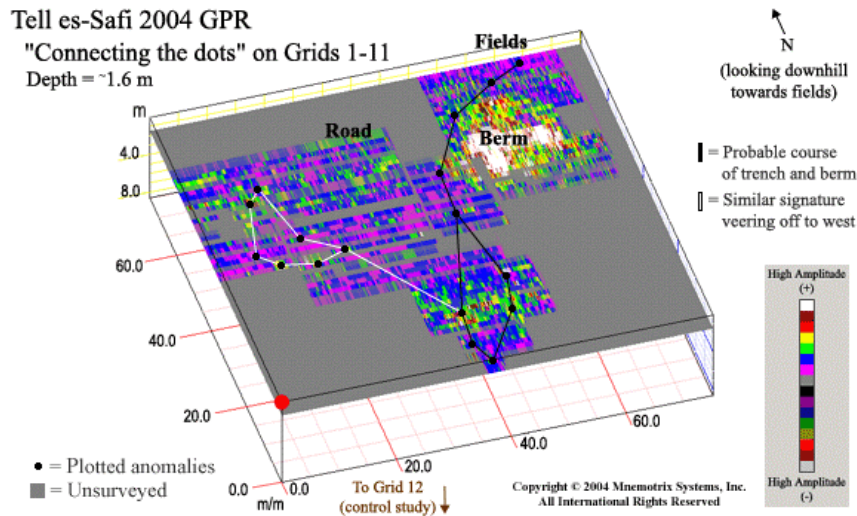


תרשים 3 : מפה סכימטית של רשתות 1 – 11 GPR 2004

בעזרת ציוד של חברת Geophysical Survey Systems, Inc. (GSSI) נאספו כל הנתונים בקיץ זה. השתמשנו באנטנה בתדר 200 מגהרץ כדי "לראות" לעומק של 3 – 5 מטר מתחת לפני הקרקע, ובאופן סריקה מכויל לסימון מרחק אופקי בתוך כל אחת מהרשתות בקווי הרוחב שב-GPR. השתמשנו בשיטות שדה סטנדרטיות, ובכלל זה מתיחת חבל במרחקים שווים לאורך גבולות המתחם של כל רשת על מנת לסייע לסקר ה-GPR הנושא את האנטנה לשמור על המרחק הנכון בתוך הרשת עצמה. ה-GPR סיפק קווי מתאר-צד (profile lines) מצפון לדרום ומזרח למערב, במרווחים של 1.0-1.5 מטר, תלוי בצפיפות שנבחרה לכל אחת מ-12 הרשתות. כמו כן, התבצע מבחן ניתוח מהירות (velocity analysis test) בשטח, על מנת להתאים את נתוני העומק של ה-GPR עם סיום הסקר לצורך עיבוד הנתונים (post-processing).

נתוני ה-GPR נלקחו למעבדה לעיבוד וצורפו יחד כדי ליצור קבוצת נתונים חוצת-רשתות לתדר 200 מגהרץ. כדי להתאים את הזמן לנתוני העומק של ה-GPR, נעשתה בשטח בדיקת-מוט (bar-test) מסורתית, שבה נעצנו מוט ברזל בצד החפירה בעומק מסוים וגררנו את האנטנה לרוחב מיקום זה כדי לציין את עומקו בננו-שניות (nanoseconds) [2]. כעת יכולנו לערוך המרות כמעט מדויקות למהירויות שבהן משתמשים בדרך כלל בקרקע מינרלי/תחולית ובאבן גיר [3, 4]. כל קבוצת נתונים/רשת נותחה ומאפייני (features) תת-קרקע עיקריים צוינו ביחס לכל

אזור שנסקר. מפות ותרשימי התמצאות שורטטו, חלקם מוצגים בחקר מקרה זה. תוצאות מלאות ניתן למצוא באתר: <http://www.mnemetrix.com/geo/essafi/trench/safi04.pdf>. רשת מספר 12 נעשתה למטרת ביקורת בסופו של סקר ה-GPR. סקרנו שטח שהשתרע על פני כ-75 מ"ר במורד צלע הגבעה, בניסיון לעקוב אחר מסלול התעלה. רשת 12 הייתה אזור בראש הגבעה, במקום שהחפיר כבר נחפר בעונות קודמות. אומנם הגיאולוגיה הייתה שונה משהו בראש הגבעה, ואומנם החפירה עצמה משנה את תוצאות ה-GPR, אך אנו האמנו בכל זאת שגילינו סימנים (חתימה-*signature*) תת-קרקעיים של החפיר באזור שידענו שהיא ממוקמת בו. בעיבוד הנתונים לאחר מכן (*post-processing*) מצאנו שחתימה זו הופיעה מחדש באזורים שבהם נראה היה שהחפיר ממוקם. עם ניתוח שאר הרשתות חיפשנו חתימה מסוג זה על מנת שנאתר שרידים מחפיר המצור העתיק היורד מאזור C. גילינו סטייה (*anomaly*) עקבית למדי בכל האזור, החל מרשת 12, שממנה ירדה החפיר צפונה בכיוון השדות. בדקנו את כל אחת מהרשתות (דבר שאפשר רזולוציה 3D גבוהה יותר) כדי לאתר את מה שנראה בעינינו כסטייה דומה, או חתימת GPR המציינת את מיקומה המשוער של החפיר. לאחר מכן שרטטנו את מיקומן של החתימות ברשת-העל, Super 3D, (תרשים 4) באמצעות נקודות שחורות.



תרשים 4: לאחר בחינת כל הרשתות (grids) יכולנו לשרטט את החתימות שהוטבעו בכל אחת מהן ולעקוב אחר המסלול המשוער של החפיר ושל שולי החפירה. דומה שחתימה דומה סתה לכיוון מערב ברשתות 2, 3 ו-4. חפירת ground truth תהיה המפתח להבנת טיבן האמיתי של סטיות GPR אלה.

המרחק בין אשכול הנקודות למערב ולמזרח הוא כ-23 מטר לעבר מרכז האזור הנסקר בגובה (elevation) נמוך יותר, כך שלא סביר היה שמרחק זה עשוי לייצג שני צדדים של חפיר המצור. ניתן לראות באופן חזותי את אזור שולי החפירה הפונה מזרחה המצוין כאזור מוגבה, ובאזור המשתרע קרוב לדרך ומעבר לה, לעומת זאת, סוקלה האדמה ועופדה וניטעו בה עצים. האזור שבראש הגבעה (רשת 9) היה ממוקם ממש מתחת לאזור החפיר שנחפר ומצפון לו, והוא ממוקם בין שני אזורים מסולעים. אם מסתכלים על הנוף הקדום והמודרני, קטע זה צריך להיות ישירות בתוך החפיר, כאשר שרידי הסוללה (berm) נמצאים במזרח. לכן היה זה אך הגיוני לחבר את הנקודות במורד הגבעה ולסטות מזרחה כפי שהדגמנו. ניתן לראות זאת בתרשים 4 שבו הקווים השחורים מציינים "מסלול משוער של החפיר ושל שולי החפירה".

אשכול ה"נקודות", או חתימת ה-GPR הדומה שבמערב, יכולים להעיד על שריד מאותה התקופה, או לפחות על משהו שהיה מותיר חותם על תת-הקרקע בדומה לעקבות התעלה. מחקר מעקב ground truth study בשני האזורים ינסוך אור על נושא זה, אולי בעונה הבאה.

בנוסף לתרשימים שאתם רואים כאן, יש בנמצא גם סרטי אנימציה המוליכים את הצופה בתוך תת-הקרקע שנועדו לסייע לארכיאולוג הראשי בניתוח ובחשיבה אסטרטגית. ניתן לצפות בהן בדו"ח המלא באתר: <http://www.mnemoatrix.com/geo/essafi/trench/safi04.pdf>.

### מסקנות:

מה שהוצג בפניכם במאמר זה הנו תוצאה של שנים רבות של עבודת שטח וניסיון ביישום שיטת רדאר חודר קרקע (GPR) באתרים ארכיאולוגיים. ההצלחה באיסוף נתונים גיאופיזיים ובהסבר לארכיאולוגים היא תוצאה של עבודת צוות. כדי לסיים סקר בתוצאות שימושיות, המאפשרות חפירה הארכיאולוגית יעילה יותר ומדויקת במטרותיה, יש צורך לנקוט גישה פעילה שבה כל הצדדים הנוטלים חלק מחליפים ביניהם מידע על בסיס קבוע. ככל שיהיה היוזן חוזר בין בגורמים השונים כך יהיו הנתונים הגיאופיזיים אפקטיביים יותר באתר המסוים.

במאמר זה עמדנו על מספר צעדים חיוניים להצלחת סקר GPR והצגנו דוגמאות להדמיה שלאחר עיבוד הנתונים (post-processing) כאמצעי עזר לארכיאולוג. עבודת שטח שנעשתה בקיץ 2004 באתר תל אל-צאפי/גת אפשרה לגלות אלמנט תת-קרקעי באורך של כ-75 מ"ר שלא הייתה מוכרת קודם לכן. כמו כן הוצעה תוכנית להמשך חפירות בעונה הבאה באזור זה. לולא ה-GPR, אינספור שעות עבודה היו מתבזבזות בחפירות במקומות שכל הנראה לא היו מניבים תוצאות משמעותיות. התוצאה הסופית היא מפה שהארכיאולוג יכול לקחת אתו לאתר ולתכנן באמצעותה את מהלכו. זוהי אחת ממטרות העל של שימוש ב-GPR בארכיאולוגיה, וככל שיותר ארכיאולוגים ינצלו את יתרונותיה של טכנולוגיה זו כך תשתפר התפוקה שאפשר להפיק ממנה. מקרה מבחן זה סיפק רקע כללי וצעדים ספציפיים לקראת הגשמת מטרה נעלה זו.



- [1] Ackermann, O, Bruins, H.J., and Maeir, A.M., 2005, A Unique Human-Made Trench at Tell es-Safi/Gath, Israel: Anthropogenic Impact and Landscape Response: *Geoarchaeology*, 20: 303-327.
- [2] Ben-Shlomo, D., Shai, I., and Maeir, A., 2004, Late Philistine Decorated Ware ("Ashdod Ware"): Typology, Chronology and Production Centers: *Bulletin of the American Schools of Oriental Research*, 335: 1-35.
- [3] Beres, M, Luetscher, M, and Olivier, R, 2001, Integration of Ground-Penetrating Radar and Microgravimetric Methods to Map Shallow Caves: *Journal of Applied Geophysics*, 46: 249-262.
- [4] Conyers, L. B., Goodman, D., 1997. *Ground-Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists*. Altamira Press, Walnut Creek, 232 pp.
- [5] Davis, J.L., Annan, A.P. 1989. *Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy: Geophysical Prospecting*, 37: 531-551.
- [6] Maeir, A., 2003, Notes and News: Tell es-Safi: *Israel Exploration Journal*, 53: 237-246.
- [7] Vaughan, C.J. 1986, *Ground-Penetrating Radar Surveys Used in Archaeological Investigations: Geophysics*, 51: 595-604.
- [8] Whiting, B. M., McFarland, D. P., and Hackenberger, S., 2001, Three-Dimensional GPR Study of a Prehistoric Site in Barbados, West Indies: *Journal of Applied Geophysics*, 47: 217-226.

