STATE OF ISRAEL
THE MINISTRY OF NATIONAL INFRASTRUCTURES
EARTH SCIENCE RESEARCH ADMINISTRATION

מדינת ישראל
משרד התשתיות הלאומיות
מינהל המחקר למדעי האדמה

Detailed Gravity study in the Lower Galilee

Michael Rybakov, Vladimir Lyakhovsky and Amit Segev

With participation of

Halel Lutzky and Reli Wald

November 2010

ES-32-2010

GSI/29/2010

STATE OF ISRAEL
THE MINISTRY OF NATIONAL INFRASTRUCTURES
EARTH SCIENCE RESEARCH ADMINISTRATION

מדינת ישראל
משרד התשתיות הלאומיות
מינהל המחקר למדעי האדמה

Detailed Gravity study in the Lower Galilee

Michael Rybakov, Vladimir Lyakhovsky and Amit Segev

With participation of

Halel Lutzky and Reli Wald

November 2010

ES-32-2010 GSI/29/2010

Table of contents

Abstract

1. Introduction 1

2. Previous gravity survey 2

3. Data acquisition 3

4. Data processing 3

5. Development and verification of the computer software for terrain corrections 4

6. Results 8

7. Conclusions and recommendations 9

Acknowledgments 10

References 11

Figures 13

Appendix 31

Hebrew abstract

Publication documentation page

ABSTRACT

The present report summarizes the achievements of the second year of the project "Gravity and magnetic study of the subsurface geology in Mount Carmel and the Yizre'el Valley". The goal of this study is to establish the detailed geological structure and fault geometry in the study area, which is one of the most populated parts of Israel. During the first year of the project we acquired land magnetic data surrounding the Yizre'el Valley. Processing the new data together with existing measurements enabled the compilation of a new detailed reduced-to-pole magnetic anomaly map of the study area (Rybakov et al., 2009). During the second year of the project, we concentrated on the gravimetric measurements, data processing and interpretation. The main result of this research is the detailed (1:50,000 scale) Bouguer gravity anomaly map of the study area compiled by gravity stations from the national Israel gravity database and ~400 new measured stations. The presented results of the gravity survey clearly demonstrate the ability to define small anomalies representing changes in composition, or structural phenomena, or both.

New computer software for gravity data processing, developed and verified during the course of this study, significantly improves our ability to calculate terrain correction and Bouguer gravity anomalies. The significant advantage of the new software is its flexibility in incorporating new digital topographic data from MAPI that became available during the last years. The new software, along with additional measurements of gravity stations, significantly improved the accuracy of the existing gravity maps and enabled detailed imaging of the sub-surface structure and composition in a scale of 1:50,000.

1. INTRODUCTION

The Galilee area, in the north of Israel, is a tectonically uplifted (isostatically non-compensated) continental margin (Segev et al., 2006a). The Moho strikes northeast and dips steeply, from ~35 km beneath the continental crust of southeastern Israel to ~23 km beneath the oceanic crust of northwestern Israel (near Haifa, Mt. Carmel and offshore Galilee) (Fig. 1). Two principal fault systems are documented in the Galilee (e.g. De Sitter, 1962; Freund 1965, 1970; Folkman, 1976; Garfunkel, 1981; Joffe and Garfunkel, 1987; Reches, 1987; Hatzor and Reches, 1990; Shaliv, 1991; Achmon and Ben-Avraham, 1997; Walley, 1998; Ben Avraham et al., 2002; Westaway, 2004; Rotstein et al., 2004; Matmon et al., 2003; Segev et al., 2006b; Schattner et al., 2006): (1) the Miocene-Recent Dead Sea Transform (DST), an active plate boundary on the east (which is not studied here); and (2) the Carmel-Gilboa or Carmel-Faria fault, between the DST and the Mediterranean, which is part of a long-lived SE-NW fault system that propagated during the Senonian (Rosenthal et al., 2000), hundreds of kilometers to the southeast (Azraq-Sirhan) and crosses the DST (Segev and Rybakov, 2010a, 2010b).

The fault pattern within the Yizre'el Valley is not well known. Rotstein et al. (2004) presented an interpretation of several shallow seismic reflection profiles and inferred the presence of major, SW-NE trending, vertical faults (Gideon and Nazerat) with strike-slip components. However, Segev et al. (2006b) and Segev and Rybakov (2010), after reprocessing and re-interpreting the seismic reflection data, suggested a different fault system below the Yizre'el Valley. This fault system connects the Gilboa and the Carmel faults, rather than the Carmel and Fari'a (N. Milhan) faults through the Jenin region.

The regional gravity and magnetic data were recently reinterpreted by Rybakov et al. (2000) and particularly Segev and Rybakov (2010b), using 3-D forward gravity and magnetic modeling, inversion schemes and updated petrophysical data of the Jurassic, Cretaceous and Tertiary sedimentary layers and volcanic rock units. These studies suggested that the Asher and Devora Jurassic volcanic structures appear to be responsible for the Atlit and Galilee negative magnetic anomalies and for significant negative gravity anomalies. These anomalies became clear after removing the gravity effect of the upper (post Turonian) light density sediments from the observed gravity. We suggest here that the Carmel-Gilboa fault propagated during the Late Cretaceous from the Levant basin, across the Galilee area southeastward, to form the Azraq-Sirhan graben in Jordan. The

Carmel-Gilboa fault is a right-step, en echelon, dextral strike-slip fault with associated tectonic basins of various shapes. During the Oligocene and before the formation of the DST, the reactivation of the Azraq-Sirhan graben was accompanied by tectonic driven rift propagation in the opposite direction, from Azraq-Sirhan to northwest. It dispersed into many faults and terminated ~10 km west of the present DST. During the Miocene it propagated in the same direction along with internal volcanic activity. The numerous Miocene-Pliocene volcanic centers on the margins of the DST indicate that the preferred pathway for magmas at that time was not within the deep basins if the DST.

Magnetic data acquisition and interpretation of gravity and magnetic data from the Yizre'el Valley were commissioned by the Geological Survey of Israel within the framework of a regional study of the Carmel-Gilboa fracture system (Segev et al., 2006; Segev and Rybakov, 2010a, b). Acquisition of magnetic data in and around the Yizre'el Valley was carried out during 2009 (Rybakov et al., 2009). The main purpose of this survey is to provide a detailed gravity map, at a scale of 1:50,000, of the study area (see Fig. 1 for location), a small part of the Lower Galilee. The present report concentrates on:

1. Recompilation and analysis of previous gravity surveys.
2. Gravity measurements north of the Yizre'el - Harod Valleys.
3. Development and verification of new computer software for gravity data processing.
4. Processing new gravity data using new computer software.
5. Compilation of new detailed gravity maps by combining the new and the previous data sets.

2. PREVIOUS GRAVITY SURVEY

The regional gravity data used in this study are part of the Israel national database. The gravity database coverage together with point locations of the present study are shown in Figure 2. The database coverage in the Menashe Hills (on the west side of the study area) and Mount Gilboa is generally poor, but it is better in regions covered by alluvium, where the spacing of the measuring stations is in the order of 400–500 m (see Fig. 6 in Segev and Rtybakov, 2010). Compilation of gravity maps using such an inhomogeneous distribution of the gravity stations causes variations in reliability at different parts of the study area. The gravity database has a reliability and accuracy that enables interpolation to a 2 mGal contour interval. It was gridded with 0.25 km spacing using the inverse distance method, gently smoothed, and can be used for a regional–scale study. All regional scale

gravity maps of the Galilee and their interpretations have been presented and discussed by Segev and Rybakov (2010). The gaps in the gravity coverage were partially filled during the present survey, and allowed the compiling of a detailed gravity map of the study area at a scale of 1:50,000.

3. DATA ACQUISITION

The gravity survey was performed during nine survey days. Field measurements were carried out using the Scintrex AutoGrav CG-3M (#808426). Approximately 400 new gravity stations were measured in order to fill the gap in the existing gravity network (see Fig. 2 for location). Gravity station spacing was ~500 meters. The base gravity station of the Geophysical Institute of Israel (GII) was used for the first and second survey days. A new base gravity station, Mizra (Fig. 3; gravity datum of 156.9 mGal), was created by a loop based on the GII base station and used for the remaining seven survey days.

The Geographic Positioning System (GPS) was used for positioning the gravity stations. ASHTECH GPS instrument (from Tel-Aviv University) was used in the kinematic mode. Satellite data, collected on the remote station, were processed using the Trimble Total Control (TTC) post-processing system and data from the Nazeret (NZRT) MAPI station.

4. DATA PROCESSING

Raw gravity data was reduced using several standard procedures. The latitude correction was calculated according to the 1967 Geodetic Reference System Formula. The gravity data were reduced using 2.67 g/cm density. This density was suggested, using the Nettleton's approach, since it caused the least influence of relief features- a few tens of meters on the resulting gravity data. This density was also used to calculate the terrain correction values, explained in detail in the next section.

The corrected data were processed and combined with the data from the national Gravity database. The data were visually examined for errors and a few stations with sizeable erroneous Bouguer anomaly values were removed.

5. DEVELOPMENT AND VERIFICATION OF THE COMPUTER SOFTWARE FOR TERRAIN CORRECTIONS

Terrain corrections for gravity data are an important and tedious data processing step for work in rugged topography, because the magnitude of the corrections may be large relative to the anomalies. Hayford and Bowie (1912) and Hammer (1939) developed a classical method of employing fan-shaped prisms (FPM) for the corrections. Bott (1959), Kane (1962), Nagy (1966) and Plouff (1966, 1977) developed computer-oriented terrain correction algorithms, the rectangular-prism method (RPM), in which topography is represented by rectangular prisms. All these methods obtain gravity terrain-correction values by computing volume integrals, in which fan-shaped or rectangular prisms are used to approximate the topographic relief discontinuously.

The Geological Survey of Israel does not hold any out-of-shelf computer software for the terrain-correction process and the project budget does not allow purchasing such software. Ofer Simantov (GII) developed a program that read the elevations from an MSF file (sum-file) and calculate the terrain correction for all the points in the gravity file using Hammer (1939) method. The terrain corrections for previous regional gravity stations were calculated up to a 20 km distance, using a DTM model with a 25 m grid from Hall (1993). However, this GII software is out of date and does not allow the use of the updated Digital Elevation Maps. Therefore, Rybakov (2001, personal communication) developed his own version of terrain correction software for detailed micro-gravity survey employing the rectangular-prism method (RPM) for the corrections, using detailed 1×1 meter geodetic measurements. The rectangular prism and fan-shaped prism methods are commonly used for the corrections. These methods assume elements have horizontal tops, an assumption which does not reflect true topography, especially near the measured station. Moreover, these methods allow for litlle flexibility when using topography databases of different resolutions on a non-regular grid. Zhou et al. (1990) developed a triangular-element method, which accounts for dipping surfaces using a Gaussian formulation and significantly improves the correction process. The method transforms the terrain-correction volume integral into a surface integral along the terrain surface. The integral for each triangular element is calculated by Gaussian quadrature and involves a simple formula employing a surface rather than a volume integral for computing the terrain corrections with high accuracy. The detailed comparison between rectangular-prism and triangular-element methods was presented and discussed by Zhou et al. (1990).

The original terrain correction software employing the triangular-element method was developed during the course of this study.

The basic principle of the triangular-element method

According to Newton's law of universal gravitation, the vertical component of the gravitational attraction, Δg, due to an arbitrary topographic mass of constant density distributed within a certain volume, V, is:

$$\Delta g = G\sigma \iiint_V \frac{z}{\left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{3/2}} dxdydz \tag{1}$$

where G is the gravitational constant, σ is the density, V is the volume between the land surface and the station elevation, (x, y, z) are the Cartesian coordinates of a point within the volume V, and the origin is at the point where the gravity effect is calculated.

Using the Gauss divergence theorem, volumetric integral (1) may be reduced to a surface integral that gives Δg (Zhou et al., 1990):

$$\Delta g = G\sigma \left(\iint_{S_2} \frac{1}{R} dxdy - \iint_{S_1} \frac{1}{R} dxdy \right) \tag{2}$$

where $R = \left(x^2 + y^2 + z^2\right)^{1/2}$ is the distance between the point where the gravity effect is calculated and point within the terrain surface S_1 or the terrain correction datum S_2.

The numerical approach to evaluating expression (2) is to choose final element discretization and calculate integral by Gaussian quadrature (e.g., Zienkiewicz and Morgan, 1983). For every numerical element, the integral is calculated by summation of the values in the Gaussian quadrature node points multiplied by the weighting factors. For the triangle element with linear shape functions, usually adopted for such calculations, the coordinates of the three quadrature node points are (½, ½, 0), (½, 0 ½) and (0, ½, ½); the weighting factors are equal to 1/3. Finally the expression (2) for the terrain correction becomes:

$$\Delta g = G\sigma \sum_{i=1}^{NE} \sum_{j=1}^{3} \left(\frac{S_i^{(2)}}{3 \cdot R_{ij}^{(2)}} - \frac{S_i^{(1)}}{3 \cdot R_{ij}^{(1)}} \right) \tag{3}$$

where index i goes through all NE triangle elements; $S_i^{(1)}$ and $S_i^{(2)}$ are the area of the elements number i of the terrain surface S_1 or the terrain correction datum S_2; $R_{ij}^{(1)}$ and $R_{ij}^{(2)}$ is the distance between the point where the gravity effect is calculated and the quadrature node point number j of the element number i.

This formula is very simple, flexible, and accurate, and may be applied to any triangulation generated for a regular or non-regular grid. Several versions of freeware two-dimensional quality mesh generators are available. One of them, "Triangle" (Shewchuk, 2005) generates exact Delaunay triangulations, constrained Delaunay triangulations, conforming Delaunay triangulations, Voronoi diagrams, and high-quality triangular meshes. The latter can be generated with no small or large angles, and are thus suitable for finite element analysis.

Numerical algorithm

FORTRAN code “TERRAIN” was developed during the present study for the IBM computer with AIX-5.3 and XLF compiler. The code reads an ASCII file with (x,y) coordinates (old Israel coordinate system) where the terrain correction is calculated and defines the size of the rectangular polygon which covers the study area. Next, it reads the ASCII file with coordinates and elevation values (DEM), and selects the points within the study area extended by a given value. Both file names and polygon extension, usually taken as 20 km, are given in the input file. Since the measured elevation with the available GPS instrument during the field survey often differs from the DEM values by several meters or even more than 10 m, the code interpolates the elevation of the point where the gravity was measured from the DEM and ignores the measured GPS value. This allows eliminating artifacts associated with a disagreement between measured GPS elevation and DEM values. “TERRAIN-1” version of the code allows combining two DEM files, a high resolution map for points within the study area and a lower resolution map to extend the polygon to account for the terrain correction after the topography at larger distances. When all the points with their elevations are ready, they are written to the file, which serves as input data for “Triangle” software loaded by “TERRAN”. When the triangulation is done, the output file of the “Triangle” with the element connection structure is ready; then the “TERRAN” continues calculating the terrain correction. The final results are stored in the ASCII file. Each line includes the number of the point; x- and

y-coordinates (old Israel coordinate system); elevation in meters, approximated using DEM and the calculated terrain correction in mGal. The calculated elevations and terrain corrections are used with other software for calculating the Bouguer gravity anomaly and creating various gravity maps.

Benchmarking simulations

For the benchmarking simulations, we used ~1,000 points from the Israel national gravity database within the polygon, shown in Figure 1. Information for every database point includes coordinates, elevation measured during previous surveys, absolute values of the gravity field, Free-Air, simple Bouguer, calculated terrain correction and complete Bouguer anomalies. First, we compared the elevations from the national gravity database with the elevation values, interpolated using DEM, to the points with the same coordinates. We used two different DEM files available at the Geological Survey. One with ~50 m grid resolution from MAPI and another with ~25 m grid from Hall (1993). Some of the calculations were done using additional high resolution, ~5 m grid, DEM (MAPI) in cooperation with S. Varshavsky (Ministry of National Infrastructures). We found a good correlation between interpolated and database elevation values (Figs. 4, 5, 6). However, for some points, the elevation difference between the gravity database values and the DEM interpolated values is above ten meters (Figs. 7, 8, 9). Figure 10 shows a histogram with the distribution of the frequency of the elevation differences. For all DEM files the distribution is very similar and has a classical Gaussian shape, expected for the case of a random noise with amplitude up to ten meters. Such disagreement between the DEM and database values may lead to significant errors in calculated terrain correction and, later on, to Bouguer anomalies, since the artificial topography "picks and wholes" produce high topographic gradients. Therefore, we suggest using interpolated value based on the most detailed DEM instead of elevations measured during the survey. This procedure was applied to the new data points measured during this study. Figures 11, 12, and 13 show that the suggested technique leads to calculated terrain correction values correlated well with the values from the national gravity database. The frequency distribution, according to the histogram (Fig. 14), shows the Gaussian shape with noise amplitude up to 0.5 mGal. Such disagreement is probably not crucial for the regional scale gravimetric study. The presented calculations demonstrate that the developed software allows calculating terrain correction using different DEM sources. The reason for the

disagreement between national gravity database elevation values and interpolated DEM values is not fully understood. It might be related to the accuracy of the elevation measured during previous exploration campaigns or to the accuracy of the available DEM. The accuracy of the calculated terrain correction strongly depends on the accuracy of the DEM. Therefore, the most updated and high-resolution elevation database should be used for the processing of the detailed gravity measurements and compilation gravity anomaly maps.

Calculation of terrain corrections

To avoid any disagreement between DEM values and elevation values measured using GPS, we used interpolated DEM elevation values instead of measured elevation values. It should also be noted that the accuracy of the coordinate values measured by GPS are significantly better than the elevation values. Figure 15 shows a map with calculated terrain correction values for the study area. Only a small part of the study area has a steep topography with significant elevations. Therefore, the terrain correction for most of the study area is below 1-2 mGal. The highest values obtained, up to 10 mGal, were for Mount Tavor. Moderated values between 2-4 mGal were obtained for Givat Hamore, En Harod, and at the slopes of the Jordan valley.

6. RESULTS

Bouguer gravity anomaly map

During the first year of the gravity survey, significant efforts were invested in the development of the original terrain correction software, employing the triangular-element method. During several campaigns we measured approximately 400 new gravity stations with ~500 meter spacing, partially filling gaps in the existing national gravity network (Fig. 2). Our new measurements allowed a compiling of a detailed Bouguer gravity anomaly map of the study area (Fig. 16). Distribution of the new gravity stations (black frames in Fig. 16) allowed us to compile a map in a scale of 1:50,000 and recognize small and significant gravity anomalies. Comparisons between previous and new Bouguer gravity anomaly maps of the study region (black contours in Fig. 16 and the colored map are based on our new measurements while contours represent the previous map) clearly show new unknown anomalies. These anomalies are up to ~5 km in diameter with

magnitude up to ~5 mGal. Their locations and trends significantly differ from previously recognized features and lead to a better definition and understanding of the subsurface geology.

Composite map of Bouguer gravity and magnetic RTP

The new Bouguer gravity anomaly map is integrated with the low resolution airborne magnetic RTP map (eastern and northern parts – A) and a small part of the higher resolution land magnetic RTP map (southwestern part – B) (Fig. 17). There is limited matching between the maps on the eastern part, however the trends are similar. At the parts that have better resolution, the matching between the maps is much better, for example in Givat Hamore. At this stage, the region that enables analysis of the potential fields is too small. Therefore, further analysis will be done for an enlargement of the study area.

7. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Our ongoing gravity and magnetic studies during the last two years in the Lower Galilee and Mt. Carmel areas have reached an important stage. Recompilation and analysis of previous gravity surveys were carried out during several years and were summarized by Segev and Rybakov (2010). New magnetic and gravity data sets, with significantly improved resolution, enable a much better understanding of the sub surface structure and composition of northern Israel. The presented results of the gravity survey clearly demonstrate the ability to define local anomalies representing changes in composition, or structural phenomena, or both. Measurement stations at a distance of ~500 m allow compilation of the Bouguer anomaly maps in a scale of 1:50,000 with detail imaging of the sub surface features.

New computer software for gravity data processing, developed and verified during the course of this study, significantly improves our ability to calculate terrain correction and Bouguer gravity anomalies. A significant advantage of the new software is its flexibility in incorporating new digital topographic data from MAPI, which became available during the last years. Our new software, together with additional measurements of gravity stations, significantly improves the accuracy of the existing gravity maps and enables detailed imaging of the sub-surface structure and composition in a scale of 1:50,000.

Acknowledgments

The authors are grateful to Yaakov Mizrahi, Shmulic Marco, Mor Kanari, Sasha Varshavski, Shmuel Grossman and John Hall for their help in doing this study.

REFERENCES

Ben-Gai, Y., Ben-Avraham, Z., 1995. Tectonic processes in offshore northern Israel and the evolution of the Carmel structure. Mar. Pet. Geol. 12 (5), 533–548.

Bott, M.H.P., 1959. The use of electronic digital computers for the evaluation of gravimetric terrain corrections. Geophys. Prosp. 7, 45-54.

Domzalski, W., 1967. Aeromagnetic survey of Israel: interpretation, IPRG Report SMA/482/67, 62 p.

Folkman, J., 1970. Aeromagnetic survey in the areas of the Golan, Shomron, Judea and Gaza offshore. IPRG Report SMA/760/70, 34 p.

Ginzburg, A., 1960. Geophysical studies in the central and northern coastal plain and the western Emeq. Ph.D. Thesis. Hebrew University, Jerusalem.

Hall, J.K., 1993. The GSI Digital Terrain Model_DTM completed. In: Bogoch, R., Eshet, Y. Eds., GSI Curr. Res., pp. 47–50.

Hammer, S., 1939. Terrain correction for gravimeter stations. Geophysics, 4, 184-194.

Hayford, J.F. and Bowie, W., 1912. The effect of topography and isostatic compensation uponthe intensity of gravity. Special Publ. 10, U.S. Coast and Geodettic Survey.

Kane, M.F., 1962. A comprehensive system of terrain correction using a digital computer. Geophysics, 27, 455-462.

Nagy, D., 1966. The prism method for terrain corrections using digital computers. Pure Appl. Geophys. 63, 31-39.

Plouff, D., 1966. Digital terrain corrections based on geographic coordinates. Geophysics, 31, 1208.

Plouff, D., 1977. Preliminary documentation for a FORTRAN program to compute gravity-terrain corrections based on topography digitized on a geographic grid. U.S. Geol. Survey. Open-file report, 77-535.

Rotstein,Y., Shaliv, G. and Rybakov, M., 2004. Active tectonics of the Yizre'el valley, Israel, using high-resolution seismic reflection data. Tectonophysics 382 (1-2), 31-50.

Rybakov, M. and Segev, A., 2004. The top of the crystalline basement in the Levant. Geochem. Geophys. Geosyst., 5, Q09001, doi:10.1029/2004GC000690.

Rybakov, M., 2008. Gravity and magnetic study of the Zion's Joseph license and Asher permit areas. Prepared for Zion Oil & Gas, Inc. Job 904/324/08.

Rybakov, M., Fleischer, L. and ten Brink, U. 2003. Structure of base fill in the Hula basin inferred from gravity data. , Isr. J. Earth Sci. 52, 113–122

Rybakov, M., Goldshmidt V., Fleischer L. and Rotstein Y., 1998. Geological "stripping" of the gravity field of Israel. Isr. J. Earth Sci. 47, 69-74.

Rybakov, M., Goldshmidt, V., Fleischer, L. and Ben-Gai, Y. 2000. 3-D gravity and magnetic interpretation for the Haifa Bay area (Israel), J. Appl. Geophys. 44 (4), 353-367.

Rybakov, M., Goldshmidt, V., Folkman, Y., Rotstein, Y., Ben-Avraham, Z. and Hall, J., 1994B. Magnetic anomaly map of Israel, scale 1:500,000, Tel Aviv. GII and Survey of Israel.

Rybakov, M., Segev, A., and Lyakhovsky V., 2008. The subsurface geology of the Lower Galilee using magnetic and gravity data. BSF report 2004046

Rybakov, M., Segev, A. and Lyakhovsky, V., 2009. Gravity and magnetic study of the subsurface geology in Mount Carmel and the Yizre'el Valley. GSI/37/2009, 27 p.

Schattner, U., Ben-Avraham, and Z., Lazar, M., 2007. Transform margin of the northern Levant, eastern Mediterranean: From formation to reactivation. Tectonics 26, 1-17.

Schattner, U., Ben-Avraham, Z., Reshef, M., Bar-Am, G.,and Lazar, M., 2006. Oligocene-Miocene formation of the Haifa basin: Qishon-Sirhan rifting coeval with the Red Sea-Suez rift system. Tectonophysics 419(1-4), 1-12.

Segev, A., Rybakov, M., Lyakhovsky, V., Hofstetter, A., Tibor, G., Goldshmidt, V. and Ben-Avraham, Z., 2006. The structure, isostasy and gravity field of the Levant continental margin and the southeast Mediterranean area. Tectonophysics 425, 137-157.

Segev, A. and Rybakov, M., 2010. History of faulting and magmatism in the Galilee (Israel) and across the Levant continental margin inferred from potential field data. J. Geodynamics, doi:10.1016/j.jog.2010.10.001.

Shewchuk, J.R., 2005. Triangle, a two-dimensional quality mesh generator and Delaunay triangulator. Computer Science Division, University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720-1776

Zhou, X., Zhong, B. and Li, X., 1990. Gravimetric terrain corrections by triangular-element method. Geophysics, 55, 232-238.

Zienkiewicz, O.C. and Morgan, K., 1983. Finite elements and approximation. Wiley & Sons.

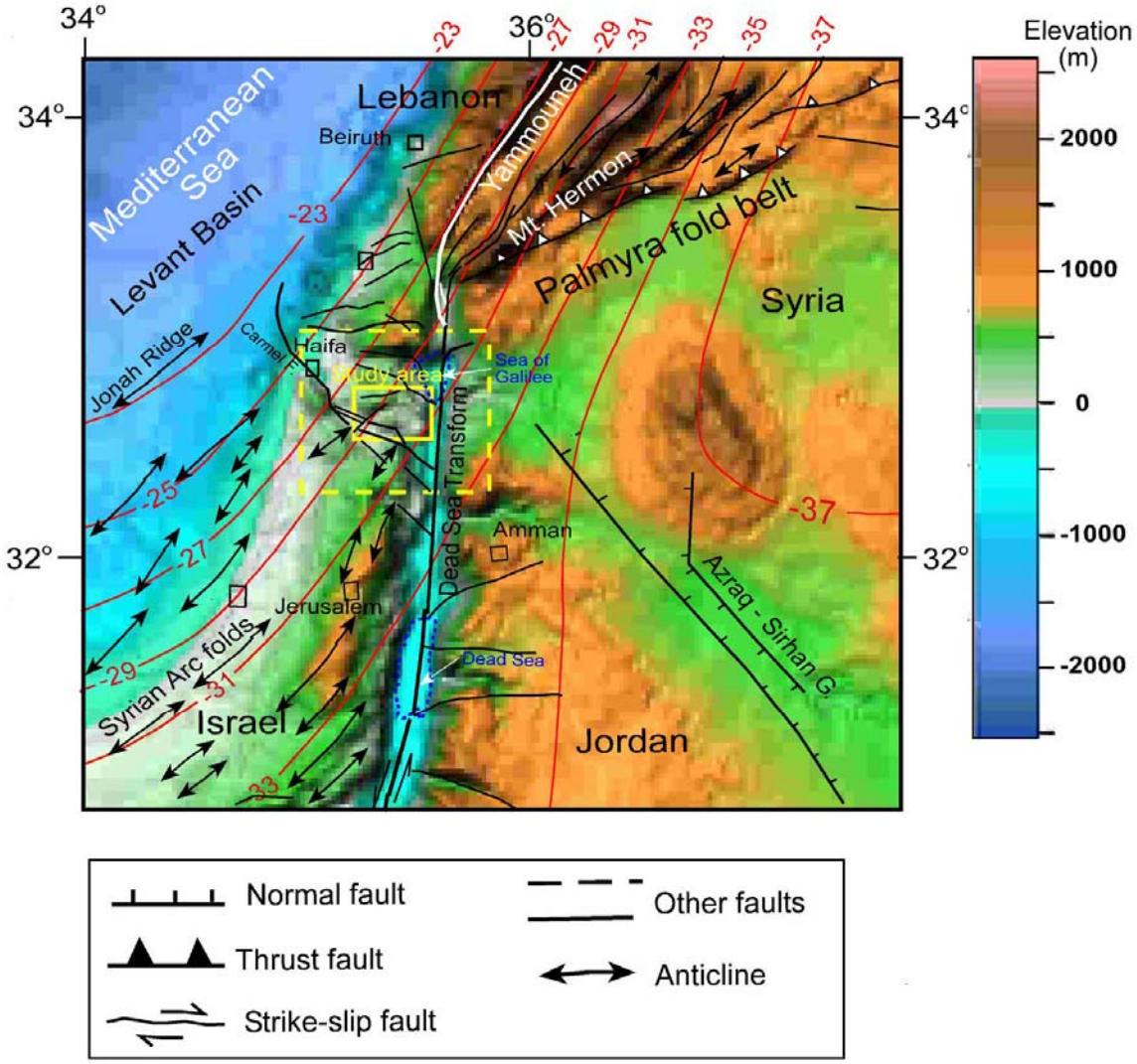


Figure 1.

Location map – Yellow solid polygon marks the study area, yellow dashed polygon marks the area used for the terrain correction. Red contour lines marks the depth to Moho (km) structural map.

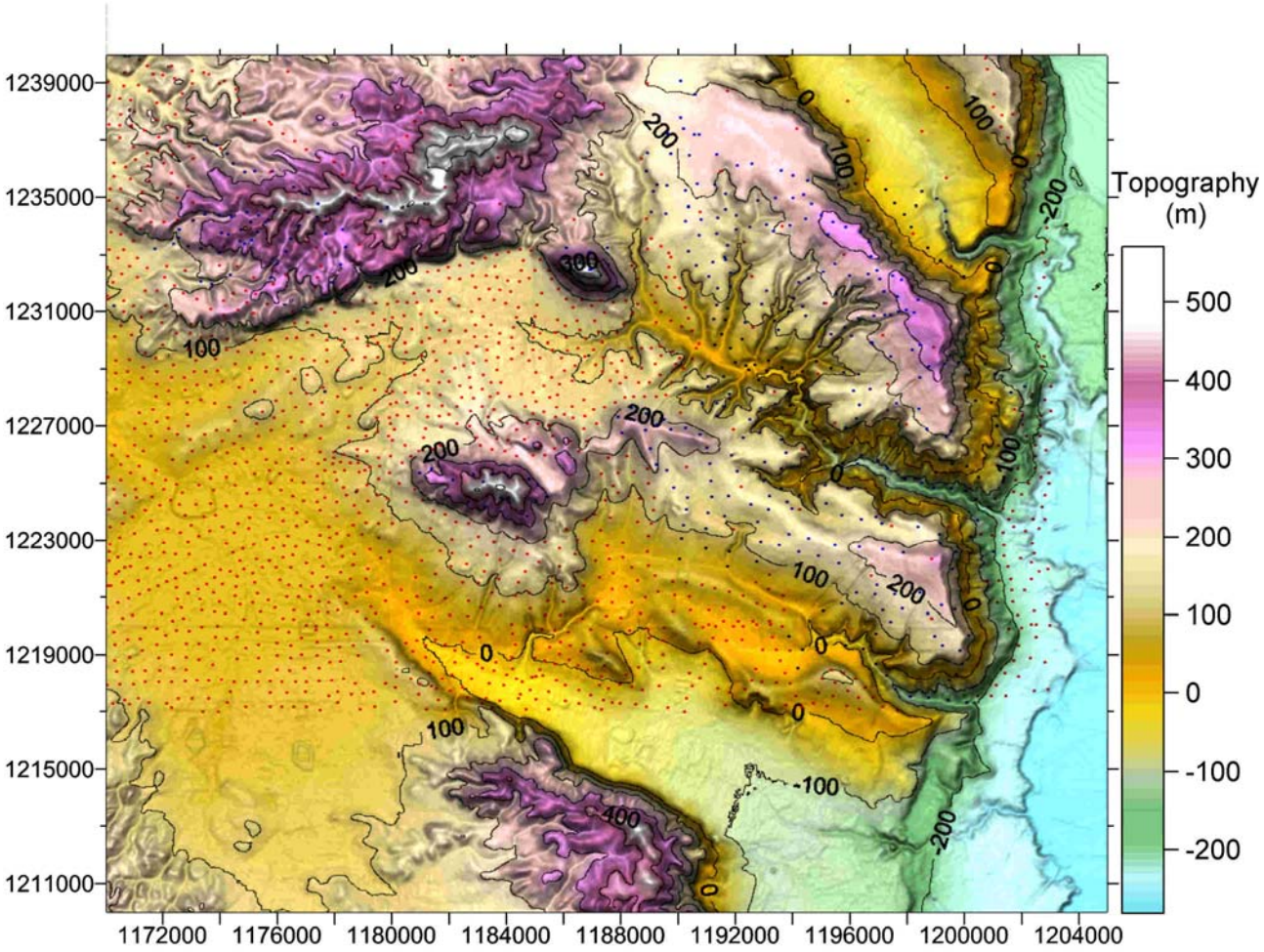


Figure 2.

Distribution of Gravity measurement stations within the study region. Red dotes - previous data set; blue dotes – measurements of the present study, superimposed on colored digital elevation map.



Figure 3. Mizra gravity base station.

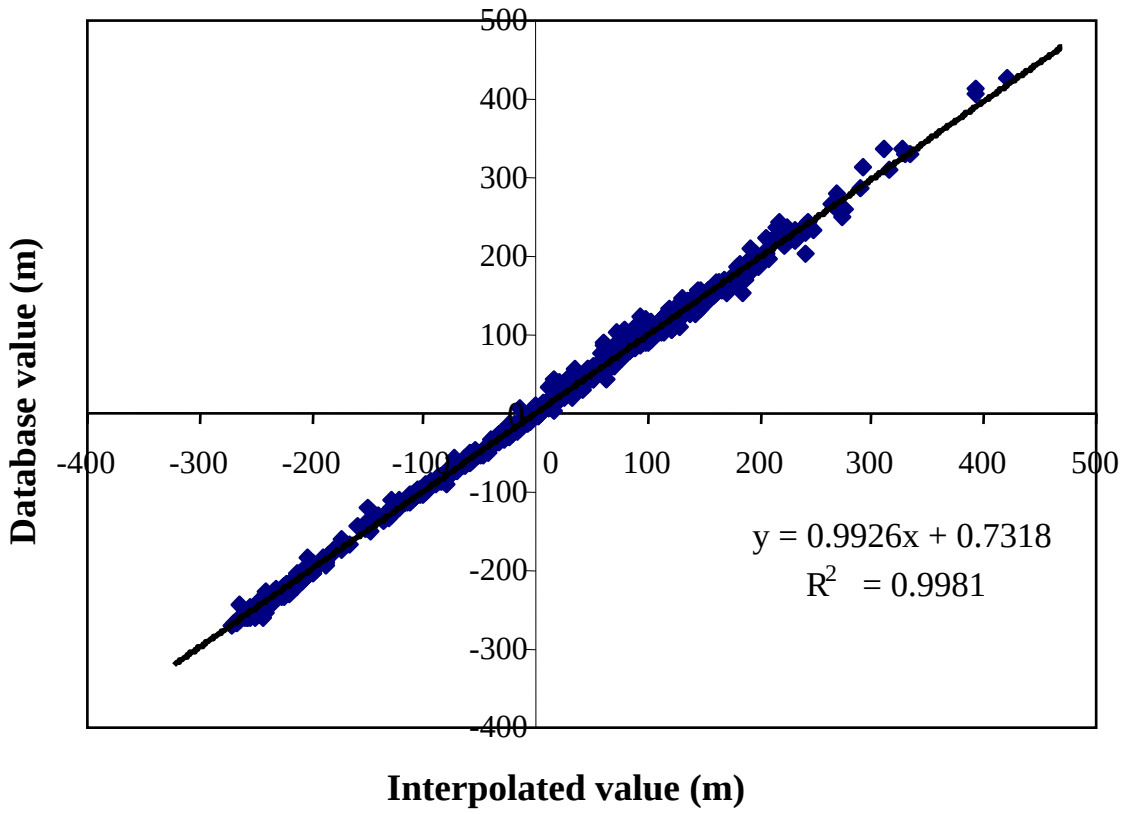


Figure 4.

Correlation between the elevation value from the national gravity database and MAPI-50 DEM.

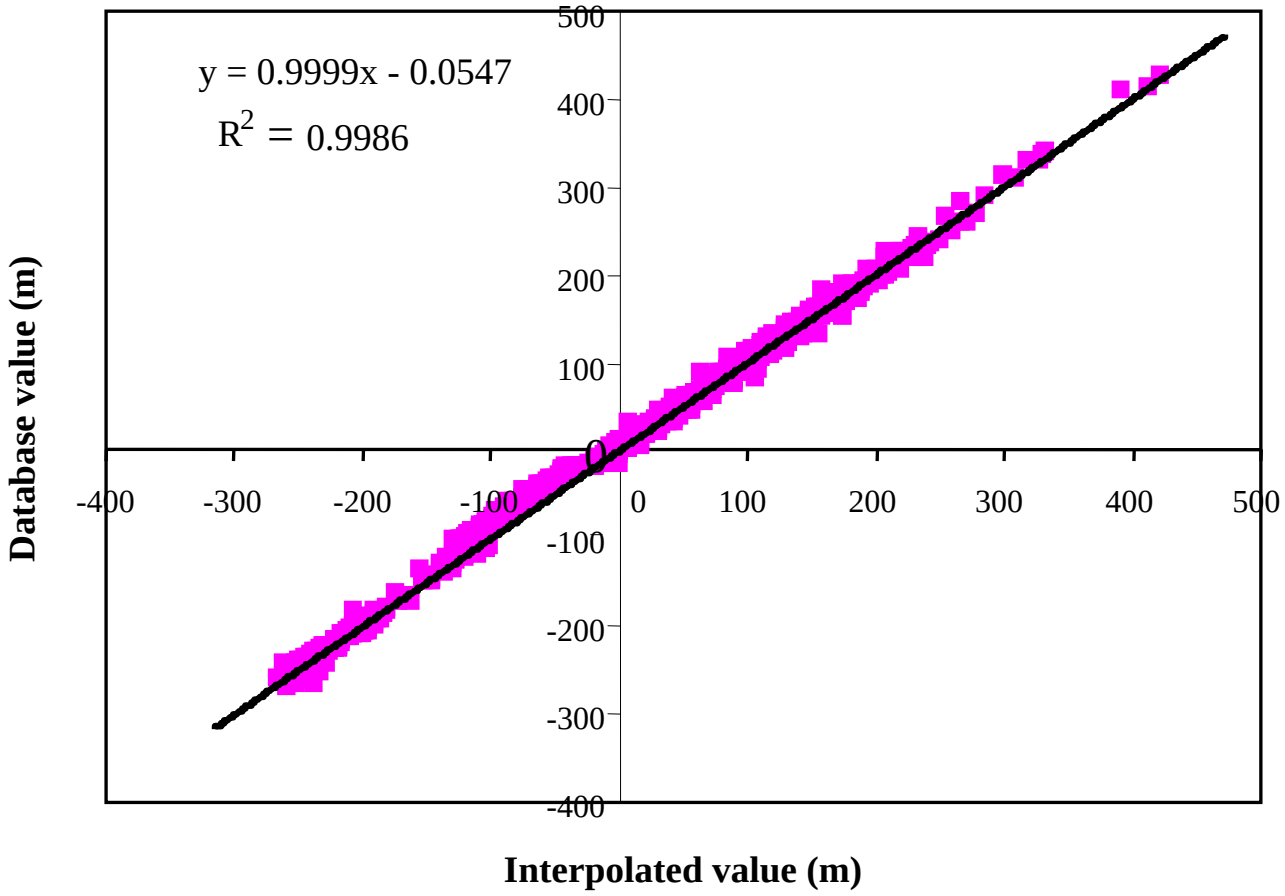


Figure 5.
Correlation between the elevation value from the national gravity database and J.Hall DEM.

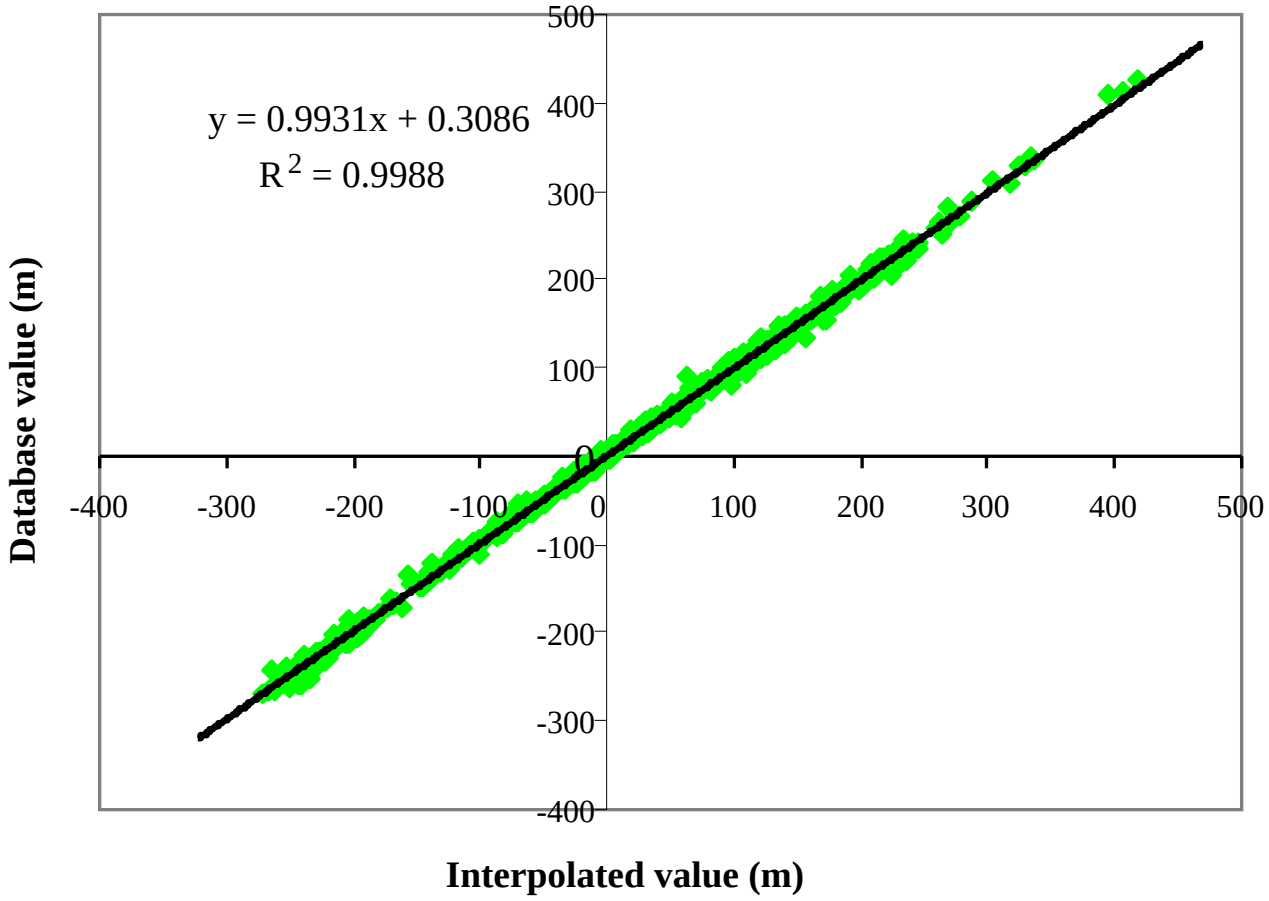


Figure 6.

Correlation between the elevation value from the national gravity database and MAPI-5 DEM

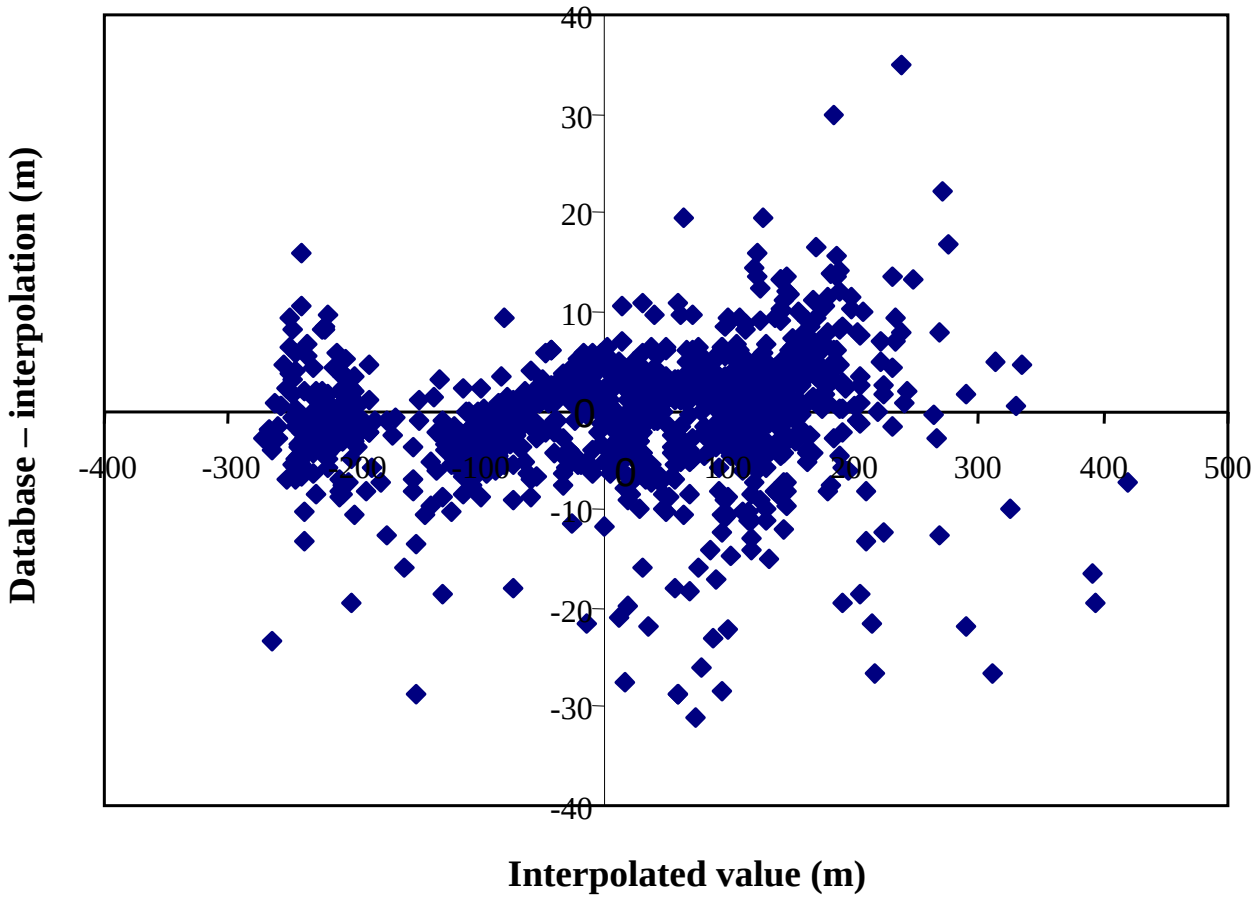


Figure 7.

Difference between the elevation value from the national gravity database and MAPI-50 DEM

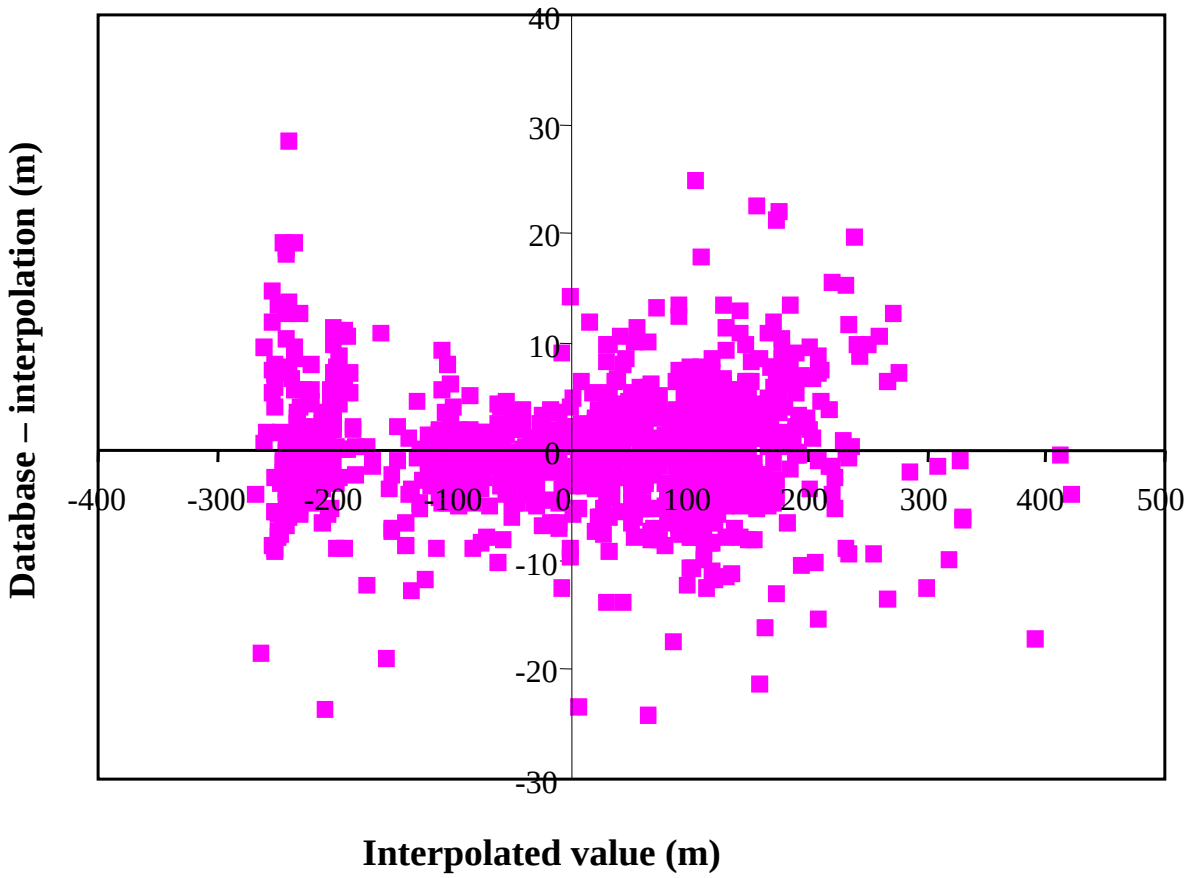


Figure 8.

Difference between the elevation value from the national gravity database and J.Hall DEM.

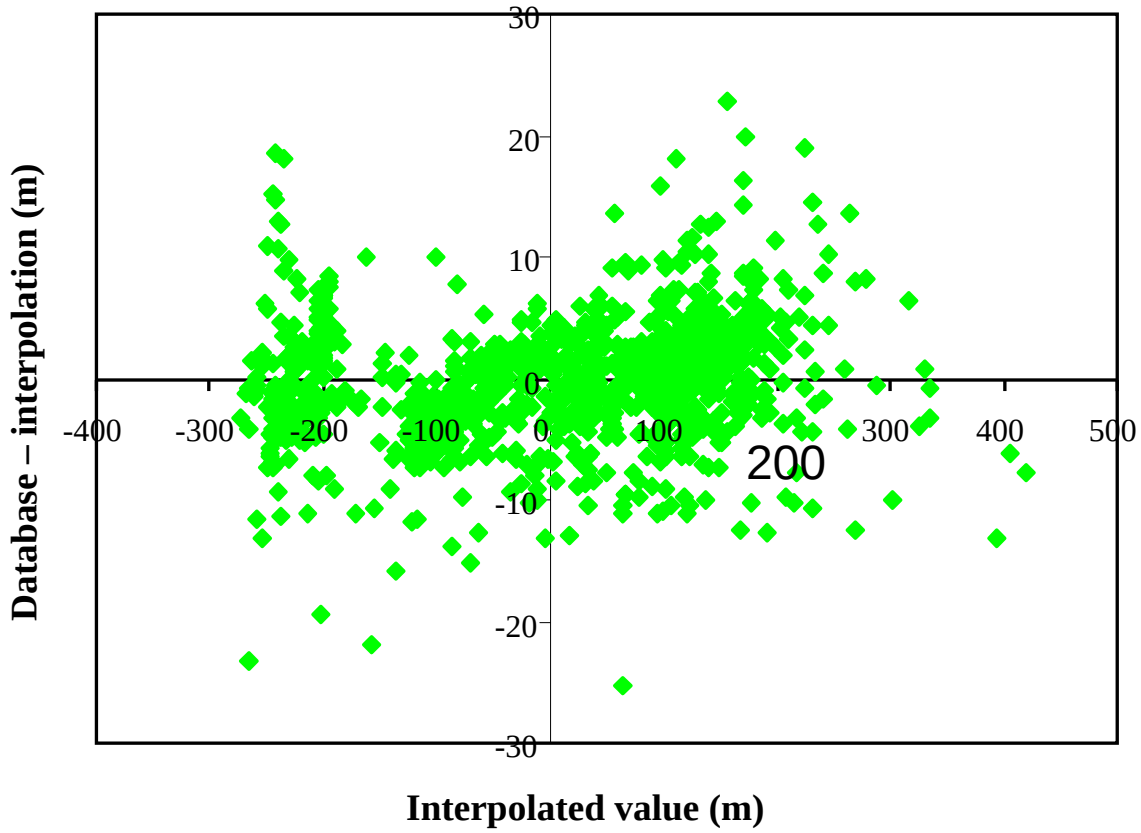


Figure 9.

Difference between the elevation value from the national gravity database and MAPI-5 DEM.

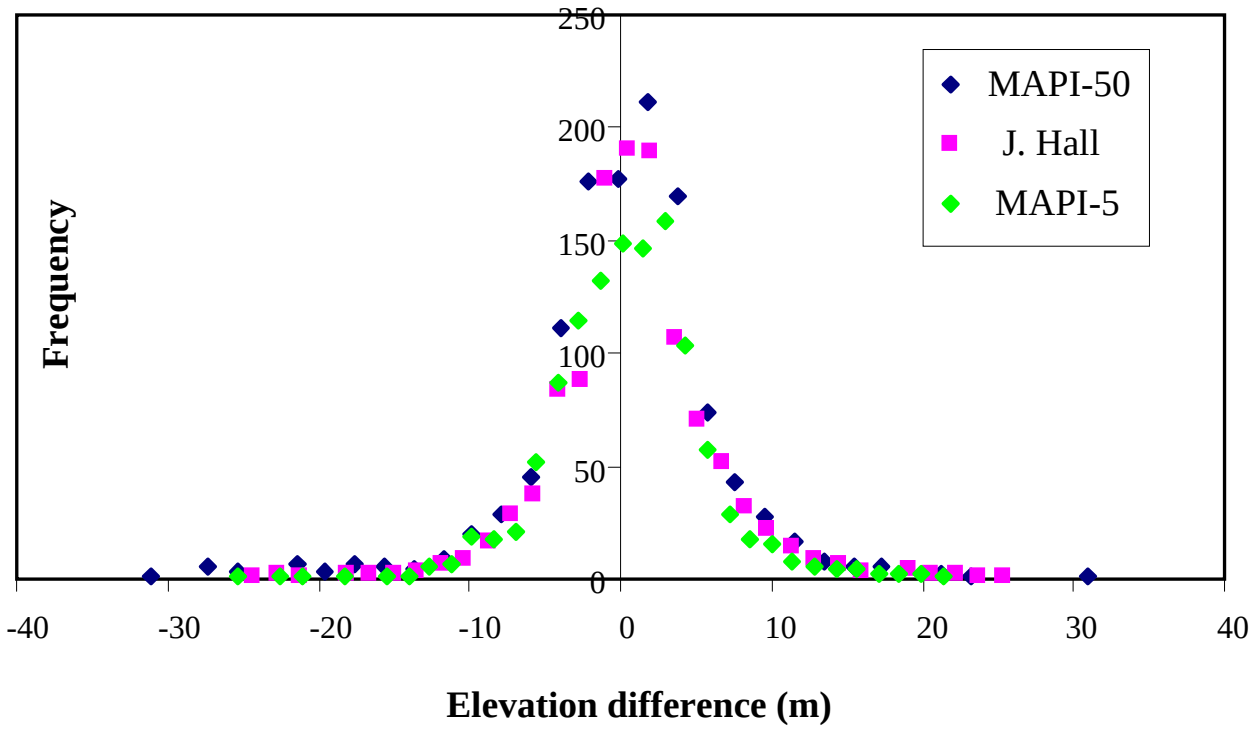


Figure 10.

Histogram represented the statistics of the elevation differences.

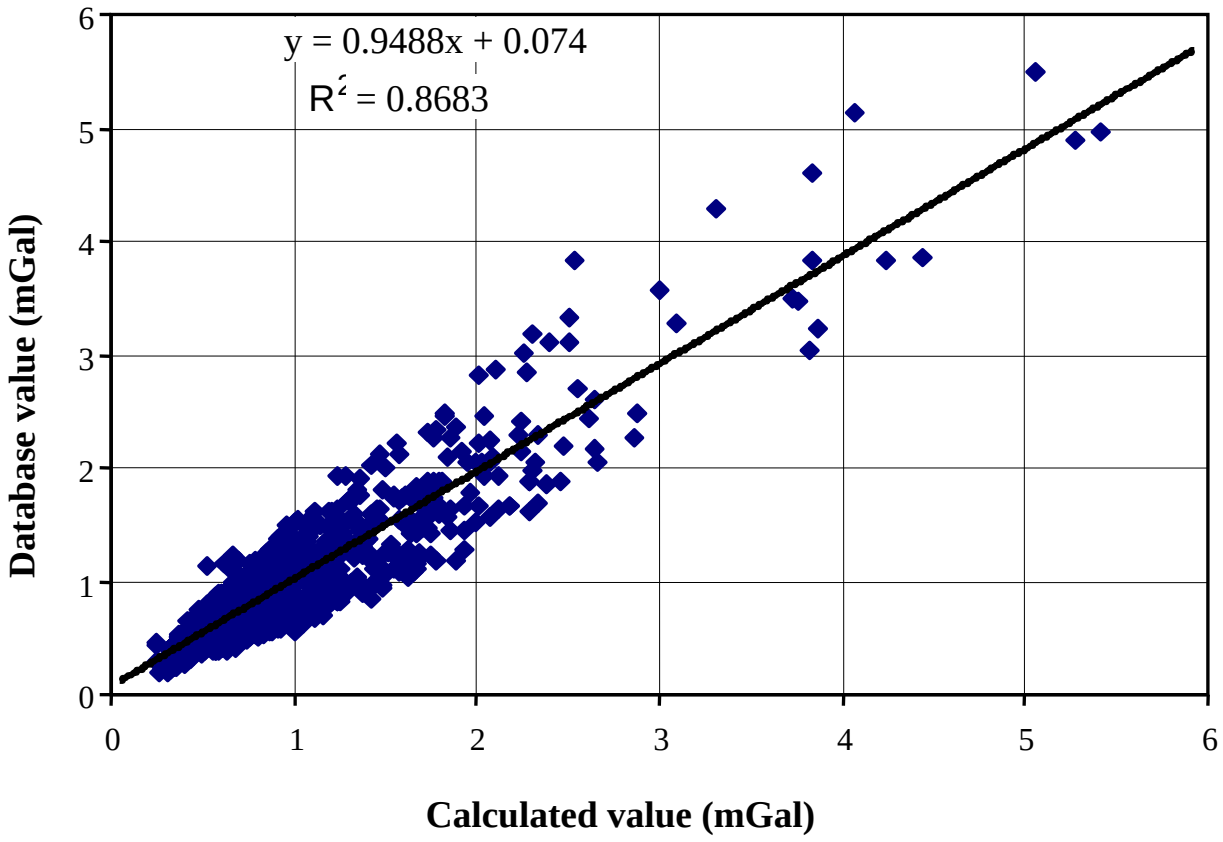


Figure 11.

Correlation between the terrain correction value from the national database and the value calculated using MAPI-50 DEM.

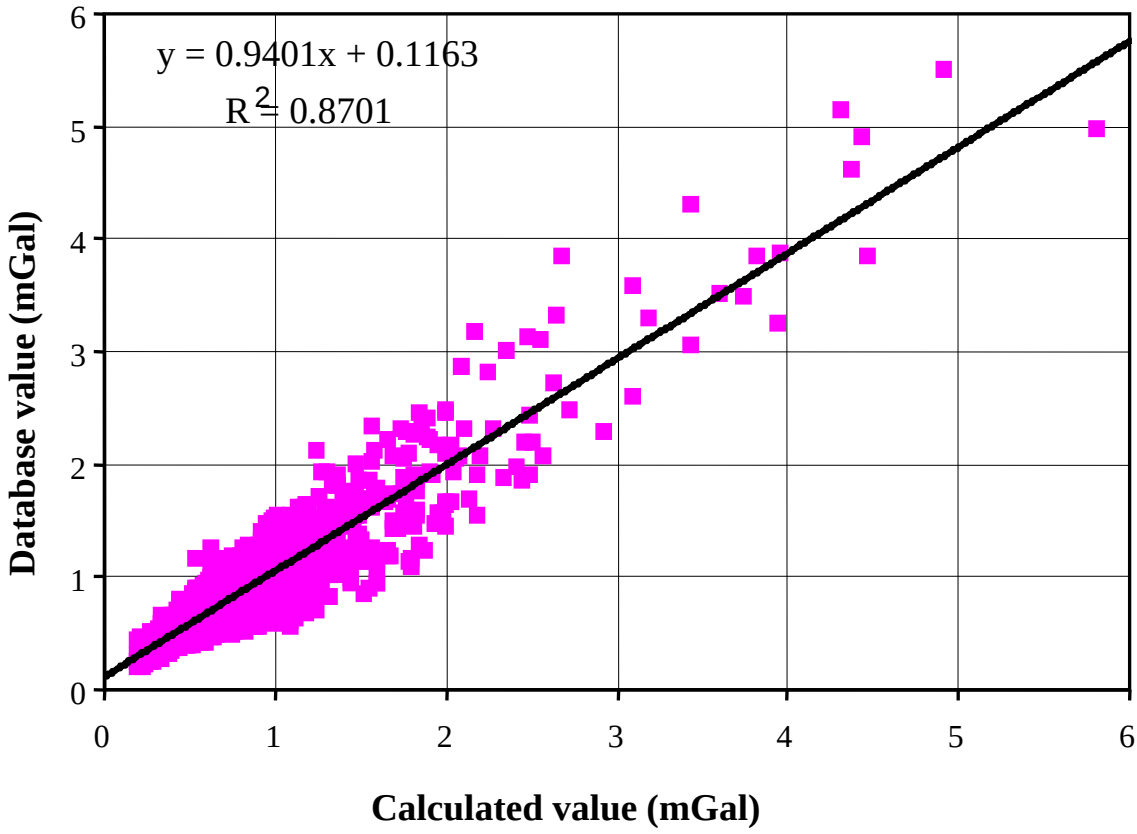


Figure 12.

Correlation between the terrain correction value from the national gravity database and the value calculated using J.Hall DEM.

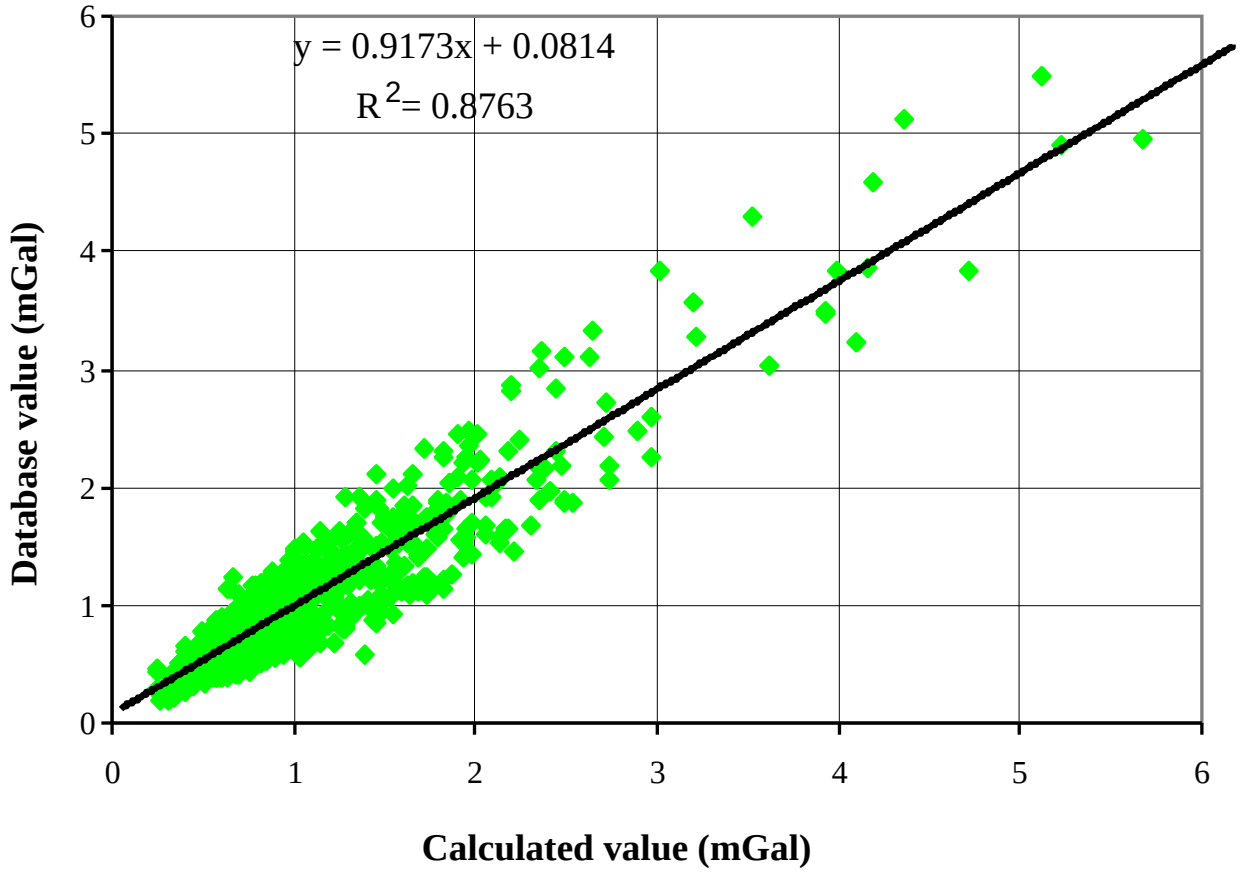


Figure 13.

Correlation between the terrain correction value from the national gravity database and the calculated value using MAPI-5 DEM.

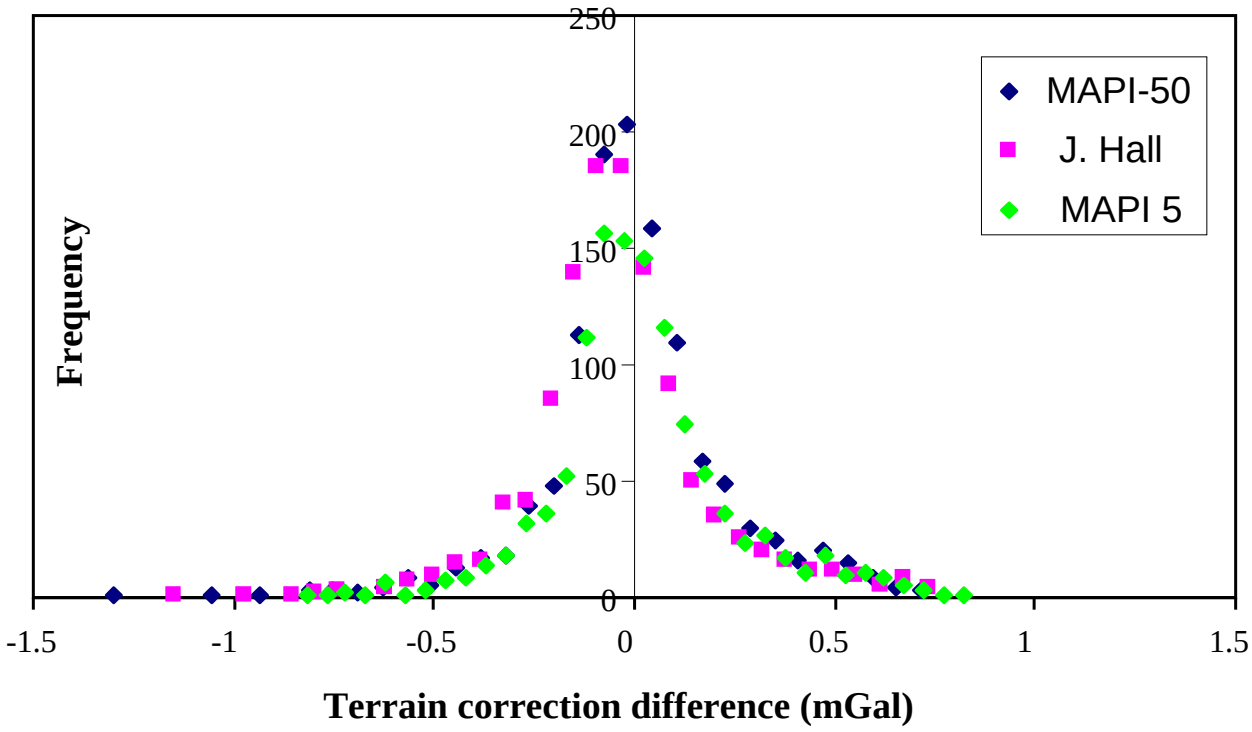


Figure 14.

Histogram represented the statistics of the terrain correction differences.

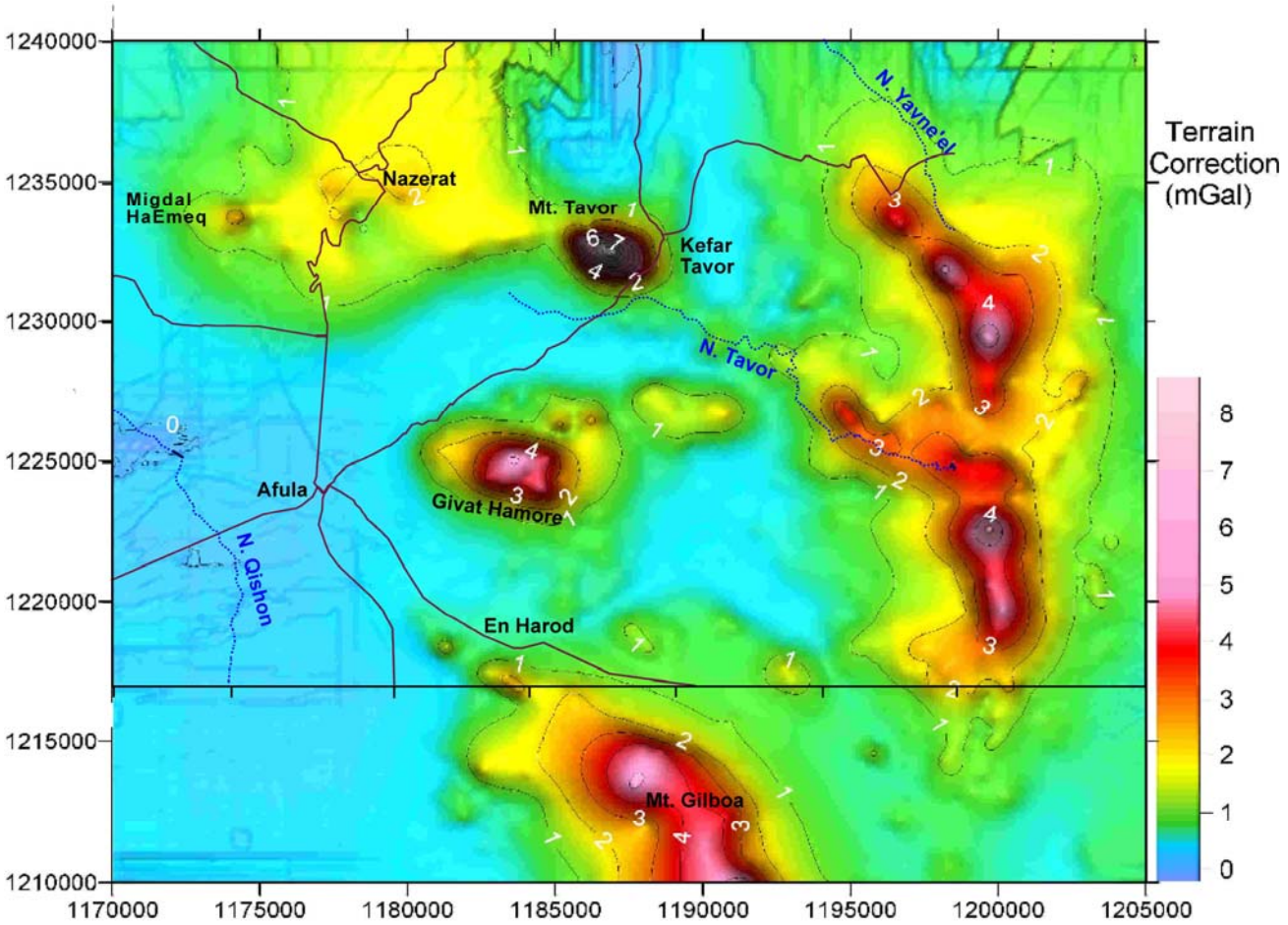


Figure 15. Terrain correction map.

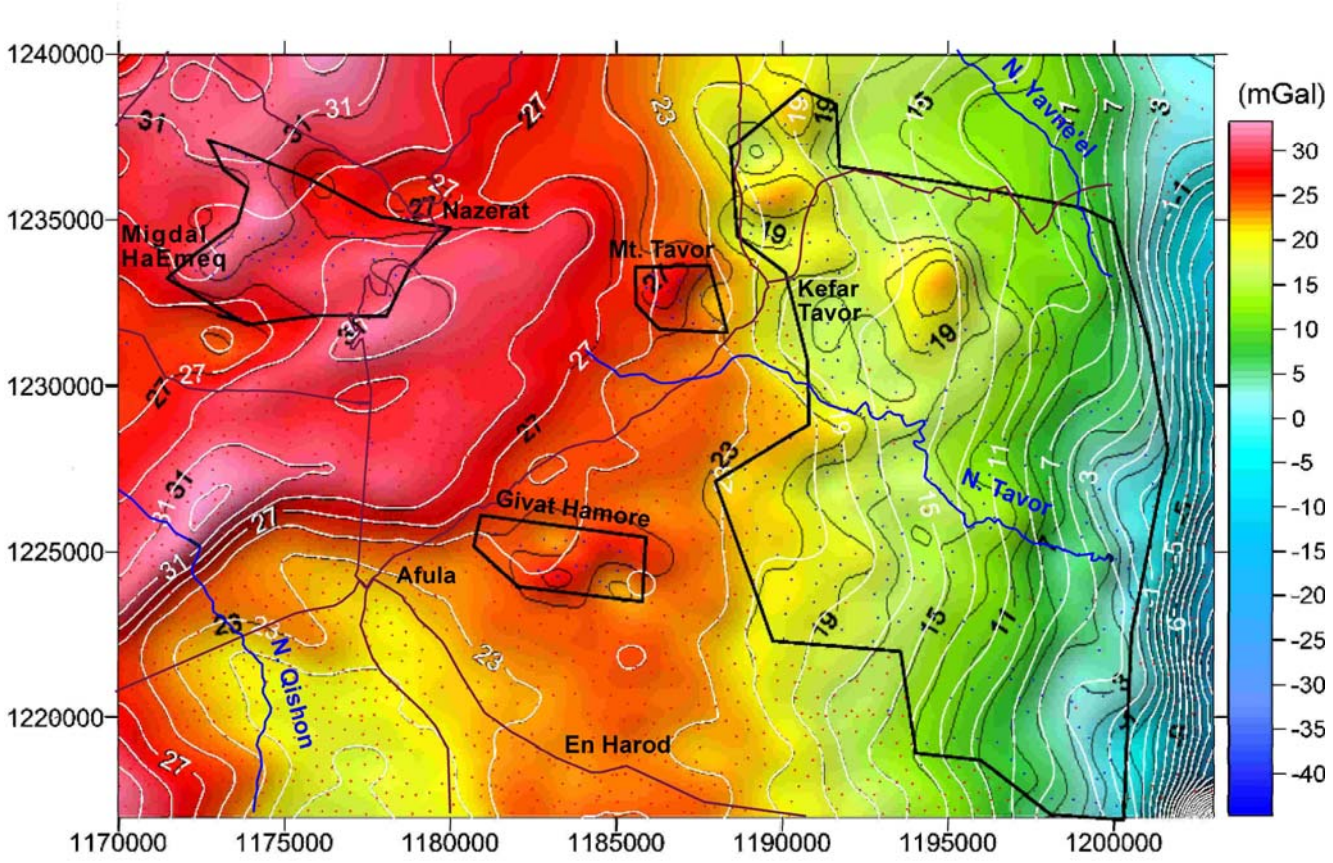


Figure 16.

Bouguer gravity anomaly map of the study survey area. Red dots denote previous gravity measurement stations, and blue dots within black frame – new measurement stations. Black contour lines (2 mGal interval) on colored surface are the new Bouguer gravity map and the white contour lines represent the previous data set.

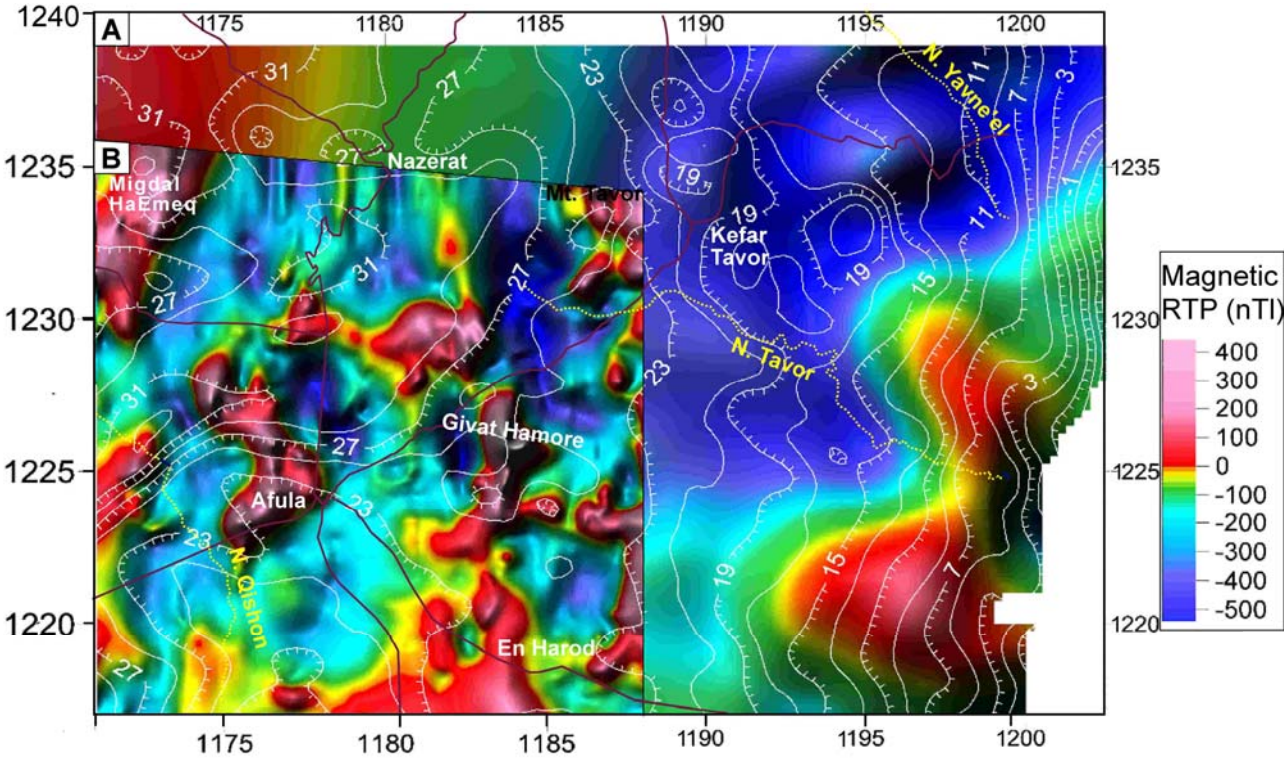


Figure 17.

Comparison between Bouguer gravity anomaly map of the study survey area (white contours - mGal) and colored magnetic anomaly maps: A) low resolution airborne survey (Domzalski, 1967); B) higher resolution land magnetic survey (Rybakov et al., 2009).

נספח Appendix

מתווה רב-שנתי לחקר תת-הקרקע של ישראל בשיטות הדמיה גיאופיסיות עם דגש על גרביטי ומגנטיקה

רקע

המחקר הגיאולוגי של ארץ ישראל נעשה בייחוד על מחשופי הסלעים בפני השטח ועל מספר מוגבל של קידוחים בעומקים שונים. מיפוי גיאולוגי שיטתי של ישראל, בקנה מידה מפורט של 1:50,000, נעשה במשך מספר עשורים בייחוד ע״י חוקרי המכון הגיאולוגי או בהדרכתם. כתוצאה מכך הוכנו מפות גיאולוגיות דיגיטליות למרבית שטחי ישראל והן מצויות בשלבים שונים של הוצאה לאור. נשארו עדיין מספר מצומצם של אזורים שעדיין לא הושלם בהם המיפוי והם נמצאים כעת בהליכי מיפוי מפורט. מפות גיאולוגיות בקנ״מ פחות מפורט (1:100,000) הושלמו כבר לכל שטח ישראל.

הדמיה של תת-הקרקע, לעומקים של קילומטרים, נעשית ע״י מספר שיטות גיאופיסיות ובעיקר: 1. קווים סייסמיים (גלים); 2. מפות שדה הכבידה (גרביטי); 3. מפות השדה המגנטי. שני האחרונים מכונים גם שדות פוטנציאל. פענוח מידע משלושת השיטות שהוזכרו נעשה בעזרת מידע על תכונות הסלעים (נתונים פטרופיסיים) בתת-הקרקע הנאסף בקידוחים.

ביצוע מדידות גיאופיסיות בשיטות השונות ואיסוף הנתונים מכלל שטחי ישראל נעשה במשך שנים רבות בייחוד ע״י המכון הגיאופיסי הישראלי. בנוסף ובמקביל בוצעו עבודות רבות ע״י חברות פרטיות לחיפושי נפט, גז, מים או מחצבים.

כאמור, נתונים גיאולוגיים וגיאופיסיים רבים מתת-הקרקע נאספו במהלך השנים ע״י גופים ממשלתיים או פרטיים והם נאגרו על ידם בשיטות שונות ובאיכויות שונות, בהתאם לתקנות וחוקים קיימים (חוק הנפט, פקודת המכרות חוק המים ועוד). מכלול הנתונים האלה סוכמו בדו״חים פתוחים או חסויים וכן במאמרים מדעיים. **עד כה לא נעשתה בישראל עבודה שיטתית של הדמיית תת-הקרקע באופן ובקנה המידה הדומים למיפוי הגיאולוגי של פני השטח.**

מידע יקר מאוד שנאסף לפני שנים רבות נמצא לעיתים בסכנת אובדן והעדר טיפול, שימור ועדכון המדיה עליו הוא נמצא עלולים לגרום לו לנזק בלתי הפיך. דוגמא לכך הם מאות סלילי טייפ מגנטי של קווים סייסמיים המצויים בפורמטים שלא ניתן יותר לקוראם בישראל.

מכוני המחקר למדעי האדמה והים מצויים כיום בתהליך של ר-ארגון אשר יותיר את המכון הגיאופיסי כחברה לביצוע סקרים סיסמיים ללא אפשרות בניית בסיס נתונים לאומי להדמיית תת-הקרקע. החוקר שטיפל שם במידע של הגרביטי והמגנטיקה (דר׳ מיכאל ריבקוב) פרש לגמלאות והנושא איננו מטופל יותר ברמה הנדרשת. תחום שדות הפוטנציאל אמור היה לעבור למכון לחקר היבשה, אך תכנית לכך איננה בנמצא.

במכון הגיאולוגי נעשה בשנים האחרונות ניסיון לקיים מחקר גרבימטרי ומגנטי באזורי הכרמל והגליל וכן הדמיה משולבת עם פענוח קווים סייסמיים של תת-הקרקע בעמק יזרעאל וסביבותיו (בשיתוף פעולה עם אוניברסיטת חיפה; Wald et al., 2009, 2010). כמו כן החל במכון הגיאולוגי פרויקט של בניית בסיס נתונים של קווים סייסמיים בישראל ובאגן המזרחי של הים התיכון (אגן הלבנט) ואף הושלמה לא מכבר עבודת דוקטור במכון הגיאולוגי שהתבססה על חומר זה

(Steinberg et al., 2008; 2010). עבודות אלה הן טיפה בים והן משמרות את היכולת המדעית, אך הן אינן יכולות לתת מענה לצורך של הקמת בסיס מידע לאומי להדמיית תת-הקרקע אשר יאגד לתוכו את כל המידע הקיים וימשיך באיסוף שיטתי של מידע, פענוחו וחקירתו.

למבנה והרכב תת-הקרקע יש חשיבות מכרעת בחקר התשתית של מדינת ישראל, כולל חיפושי נפט, גז ומחצבים, וכן הבנת מאגרי המים התת-קרקעיים (אקוויפרים) וניהולם. כמו כן, כל מחקרי הסיכונים לרעידות אדמה המשקללים את מרכיב התשתית נדרשים להציג התייחסות כמותית לתווך התת-קרקעי. בנוסף, יש תחום רחב ביותר של צרכים למידע מתת-הקרקע הרדוד: מחצבות ומחפורות, מינהור, תשתיות עירוניות וכד'. לחקר שדה הכבידה יש גם היבטים חשובים בביצוע מדידות GPS וכן היבטים ביטחוניים. במוסדות ההוראה האוניברסיטאיים בישראל כמעט שלא מלמדים תחום זה.

לאור ניסיונם של המחברים בתחום חשוב זה, לאור תהליך הר-ארגון העכשווי במכוני המחקר למדעי האדמה במשרד לתשתיות לאומיות, ולאור ממצאי הגז הגדולים בתת-הקרקע של אגן הלבנט, אנו מבקשים להציג בעת הזו מתווה כללי וראשוני להדמיית תת-הקרקע בישראל ובאגן הלבנט. מהיקף העבודה הנדרשת ואופייה מובן שמתווה זה אמור להתפרס על פני שנים וזאת כתלות במטרות ובמשאבים שיוקצו לכך.

שדה הכבידה (גרביטי)

עיון בדו"ח הנוכחי ובמאמר של Segev and Rybakov (2010) מראה בברור את פערי המידע שנאסף עד כה בישראל. על פי רב, באזורי העמקים ושפלת החוף יש צפיפות מדידות מספקת ובאזורי הגבעות וההרים צפיפות המדידות בלתי מספקת. לאור זאת, מפות הגרביטי הקיימות הן ברזולוציה נמוכה המקבילה למפות הגיאולוגיות בקנ"מ של כ- 1:200,000.

כדי להיות מסוגלים לבצע הדמייה של תת-הקרקע בקנ"מ הסטנדרטי עבור הגיאולוגיה של פני השטח, דהיינו בקנ"מ 1:50,000, נדרש לצופף את המדידות הקיימות לרשת בצפיפות של 800-500 מ' בין נקודות המדידה. זאת בדומה למצב הקיים באזורי העמקים ושפלת החוף. בדו"ח הנוכחי רואים בברור כי ציפוף נקודות המדידה הגרבימטריות אפשר לנו לגלות אנומליות בגודל של עד כ-5 קילומטרים ובערכים של כ-5 מיליגל, המייצגים כנראה גופים תת-קרקעיים בעלי צפיפות שונה מסביבתם.

שיטת עיבוד הנתונים שהוצגה בדו"ח הנוכחי עושה את תיקוני הטופוגרפיה והשפעת התבליט (Terrain correction) בעזרת שימוש ב-DEM מפורט. בשיטה זו קל יותר לעבוד על יחידות שטח קטנות יחסית (כ-40 קמ"ר) המתאימות לשטח הנכלל בגיליון סטנדרטי בקנ"מ של 1:50,000.

לביצוע מדידות בשדה נדרש גרבימטר ו-GPS מתאים (שניהם זמינים כיום) המופעלים בצוות עבודה רכוב של כ-3 עובדים. ביצוע המדידות יכול להיעשות גם ע"י מכשירנים מיומנים. עיבוד הנתונים, הכנת מפות, ביצוע של פענוח מתקדם ובנייה ותחזוק של בסיס נתונים לאומי יכולים להיעשות ע"י חוקר אחד במשרה מלאה.

שדה מגנטי

שטחה של מדינת ישראל נסקר ע"י סקר מגנטי אווירי בשנות השישים של המאה העשרים (Domzalski, 1967). סקר זה היה אנלוגי, במרווחים של כ-2 ק"מ בין קווי הטיסה ובגובה של כ-1000

מ׳ מעל פני הים. הפרמטרים של סקר זה, ברזולוציה נמוכה, מאפשרים אך ורק הבחנה של אנומליות מגופים בעלי מיגנוט גבוה הקבורים בעומק רב יחסית. כיום מקובל לבצע סקרים אוויריים ברזולוציה גבוהה כאשר המרווח בין קווי הטיסה הוא מאות מטרים והגובה כ-100 מ׳ מעל פני השטח. סקרים מסוג זה, ע״י גורמים פרטיים או כחלק ממחקר, נעשו באזורים קטנים בערבה הדרומית, אזור אילת וחלק מהשוליים המערביים של ים המלח.

במחקר הנוכחי, במהלך שנת 2009, נעשה סקר מגנטי רגלי לאורך הקווים הסייסמיים בעמק יזרעאל עם קווים משלימים בשטחים ללא כיסוי מתאים. התוצאה הראתה אנומליות מגנטיות רבות שלא נראות בתוצאות הסקר הרגיונלי (חלק מהמפה נמצאת בדו״ח הנוכחי, איור 17).

כיסוי שטחים נרחבים במדידות מגנטיות ברזולוציה גבוהה נעשה ע״י סקר אווירי ובשטחים מוגדרים בהם יש עניין נעשים סקרים רגליים. סקר אווירי רגיונלי נעשה בד״כ כסקר תשתיתי ע״י גורמים שלטוניים, או כחלק מפרוספקציה ע״י חברות פרטיות (נפט, גז, מחצבים, מים). בשטחים המכוסים במים הסקרים הם ימיים (ע״י אוניה) והם נעשו בד״כ לאורך קווים סייסמיים או סקרים בתימטריים.

ביצוע סקר מגנטי אווירי ברזולוציה גבוהה של כל שטחי מדינת ישראל יעלה מספר מיליוני ש״ח ולכן הוא מטלה לאומית. לאומת זאת ביצוע סקרים מגנטיים רגליים באזורים נבחרים יכולה להתבצע בעזרת מגנטומטר שעלותו כ-20,000 $ המופעל ע״י צוות של שני עובדים בשדה. כיום אין מכשיר מסוג זה זמין לעבודה. עיבוד הנתונים, הכנת מפות, ביצוע של פענוח מתקדם ובנייה ותחזוק של בסיס נתונים לאומי אמורים להיעשות ע״י אותו החוקר שעוסק בחקר הגרביטי.

סיכום

- הדמיה של תת-הקרקע בישראל, בקנה מידה של 1:50,000 מהווה את אחת מהמטלות החשובות ביותר של המכונים לחקר היבשה והים. בתחום זה, ובייחוד בשיטות גרביטי ומגנטיקה, נבנה עד כה (במכון הגיאופיסי הישראלי) בסיס נתונים לאומי ברזולוציה נמוכה ועל מכון מחקר ממשלתי מוטלת המשימה לשמרו ולהשביחו. יתרה מכך, עקב מהות הנושא יש להתייחס לביצועו כאל מטלה שלטונית המבוצעת מתקציב מכוני המחקר הממשלתיים, בדומה למיפוי הגיאולוגי הסטנדרטי.
- האמצעים הדרושים לשמר ולהרחיב את בסיסי הנתונים הקיימים בתחום שדות הפוטנציאל הם: 1) גרבימטר ו-GPS מתאים (קיימים במערכת המחקר הממשלתית); 2) מגנטומטר לסקר רגלי (חסר במערכת), מגנטומטר ימי (נמצא בחיא״ל ושייך לג׳ון הול); 3) תוכנות מדף ייעודיות ומודרניות לשימור נתונים, עיבוד נתוני המדידות החדשות וביצוע הדמיות של תת-הקרקע תוך שיתוף נתוני שדות פוטנציאל, קידוחים וקווים סייסמיים. מומלץ לכסות את שטחי מדינת ישראל בסקר מגנטי אווירי ברזולוציה גבוהה.
- כוח אדם – חוקר אחד יכול לכסות את הצרכים בתחום שדות הפוטנציאל כשלצורך מדידות בשדה נדרש טכנאי (מכשירן) המסוגל גם לעבוד באופן עצמאי.

מקורות

Steinberg, J., Gvirtzman, Z., Gvirtzman, H., Ben-Gai, Y., 2008. Late Tertiary faulting along the coastal plain of Israel. TECTONICS, 27; doi:10.1029/2007TC002151.

Wald, R., Schattner, U., Segev, A., Ben-Avraham, Z., 2009. The subsurface pattern of the lower Galilee basins – structure and tectonics. Isr. Geol. Soc. Annu. Meet. Kfar Blum, p. 132.

Wald, R., Schattner, U., Segev, A., Ben-Avraham, Z., 2010. Subsurface structural analysis of the Lower Basalt Formation across the Yizre'el basin. Isr. Geol. Soc. Annu. Meet. Eilot, p. 156.

PUBLICATION DOCUMENTATION PAGE

<table>
<tr><td>1. Publication No. ES-32-2010</td><td colspan="2">2.</td><td>3. Recipient Accession No.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4.Title and Subtitle:
Detailed Gravity study in the Lower Galilee</td><td colspan="3">5.Publication Date: November 2010</td></tr>
<tr><td colspan="3">6. Performing Organization Code</td></tr>
<tr><td>7. Authors: Rybakov, Lyakhovsky and Segev</td><td colspan="3">8. Performing Organization Rep. No. GSI/29/2010</td></tr>
<tr><td rowspan="2">9. Performing Organization Name and Address: GSI, 30 Malkhei Israel St., Jerusalem</td><td colspan="3">10. Project/ Task / Work Unit No.</td></tr>
<tr><td colspan="3">11. Contract No. 28-17-47</td></tr>
<tr><td rowspan="2">12.Sponsoring Organization Name and Address:
(a)The Ministry of National Infrastructures
P.O.B. Box 13106, 91130 Jerusalem</td><td colspan="3">13. Type of report and period covered
Final report</td></tr>
<tr><td colspan="3">14. Sponsoring Organiation Code</td></tr>
<tr><td colspan="4">15. Supplementary Notes</td></tr>
<tr><td colspan="4">16. <u>Abstract</u>.
The present report summarizes the achievements of the second year of the project “Gravity and magnetic study of the subsurface geology in Mount Carmel and the Yizre’el Valley”. The goal of this study is to establish the detailed geological structure and fault geometry in the study area, which is one of the most populated parts of Israel. During the first year of the project we acquired land magnetic data surrounding the Yizre'el Valley. Processing the new data together with existing measurements enabled the compilation of a new detailed reduced-to-pole magnetic anomaly map of the study area (Rybakov et al., 2009). During the second year of the project, we concentrated on the gravimetric measurements, data processing and interpretation. The main result of this research is the detailed (1:50,000 scale) Bouguer gravity anomaly map of the study area compiled by gravity stations from the national Israel gravity database and ~400 new measured stations. The presented results of the gravity survey clearly demonstrate the ability to define small anomalies representing changes in composition, or structural phenomena, or both.

New computer software for gravity data processing, developed and verified during the course of this study, significantly improves our ability to calculate terrain correction and Bouguer gravity anomalies. The significant advantage of the new software is its flexibility in incorporating new digital topographic data from MAPI that became available during the last years. The new software, along with additional measurements of gravity stations, significantly improved the accuracy of the existing gravity maps and enabled detailed imaging of the sub-surface structure and composition in a scale of 1:50,000.</td></tr>
<tr><td colspan="4">17. Keywords: Gravimetric ground survey, terrain correction, Yizre’el Valley.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">18. Avaibility Statement</td><td>19. Security Class
(This Report)</td><td colspan="2">20. Security Class
(This Page)</td></tr>
<tr><td>21. No. of the Pages</td><td colspan="2">22. Price</td></tr>
</table>

תקציר

הדו״ח הנוכחי מסכם את התקדמות שנתו השנייה של המחקר: ״מחקר גרבימטרי ומגנטי של תת-הקרקע באזור הר הכרמל ועמק יזרעאל״. מטרת המחקר היא להקים את המבנה הגיאולוגי המפורט והגיאומטריה של ההעתקים באזור המחקר, המיושב בצפיפות רבה. במהלך שנת המחקר הראשונה נאספו בייחוד נתונים מגנטיים בסקר רגלי אשר היוו את הבסיס למפה מגנטית (RTP) מפורטת של אזור המחקר (Rybakov et al., 2009). במהלך השנה הנוכחית, השנייה, התמקדנו במדידות גרבימטריות, עיבוד נתונים ופירושם. התוצאה העיקרית של שנה זו היא מפה מפורטת של אנומליות בוגה (בקנ״מ 1:50,000) אשר נבנתה מנקודות המדידה הישנות, שבבסיס נתוני הגרביטי הלאומי, יחד עם כ-400 נקודות מדידה חדשות. מפת אנומליות הבוגה שהתקבלה מראה בבירור את היכולת להגדיר אנומליות קטנות (קטן מ-5 ק״מ) המייצגות שינויים בהרכב הסלעים, במבנה שלהם או בשניהם גם יחד.

בנוסף, פותחה במחקר הנוכחי תוכנת מחשב חדשה לעיבוד נתונים גרבימטריים. תוכנה זו משפרת באופן משמעותי את יכולתנו לחשב את תיקון השטח (terrain correction) ואת אנומליות הבוגה. יתרון נוסף לתוכנה החדשה הוא הגמישות שלה בשימוש של נתוני פני שטח דיגיטליים (DEM) ברזולוציות שונות, כפי שנמצא במרכז למיפוי ישראל (כולל בשריג של כ-5 מ׳). השימוש בתוכנה החדשה אפשר לנו לשפר את הדיוק של מפות הבוגה הקיימות ובשל כך לבצע הדמיה של מבנה והרכב תת-הקרקע בקנ״מ של 1:50,000.

משרד התשתיות הלאומיות
המכון הגיאולוגי

מחקר גרבימטרי מפורט בגליל התחתון

מיכאל ריבקוב, ולדימיר ליחובסקי ועמית שגב

בהשתתפות:

הלל לוצקי ורלי ולד

נובמבר 2010

ES-32-2010 GSI/29/2010