

הדאטום האופקי והאנכי בישראל

גרשון שטינברג

מבוא

על מנת להגדיר מיקום של נקודה כלשהי על פני כדור הארץ אנו נזקקים למערכת קואורדינטות כלשהי. מערכת קואורדינטות כזאת יכולה ללבוש צורות שונות, מהן לעתים נוח להשתמש באחת ולעתים באחרת. כל המערכות הללו הן קבועות ביחס לקרקע, כך שבאופן כללי הקואורדינטות של הנקודות לא משתנות עם הזמן. להלן המערכות המקובלות:

(א) מערכת קרטזית (ישורת זווית) עולמית Z, Y, X . ציר Z יהיה באופן טבעי מקביל לציר הסיבוב של כדור הארץ והצירים X ו- Y יסתובבו עם כדור הארץ. באופן אידיאלי, ראשית הצירים צריכה להתלכד עם מרכז הכובד של כדור הארץ, דבר שהיה בלתי אפשרי לביצוע עד עידן הגאודזיה הלוויינית.

(ב) קואורדינטות אליפסואידליות. אורך ורוחב על אליפסואיד (מכונה גם ספרואיד כשמדובר בכדור הארץ) כלשהו כפי שנראה בהמשך. לכל נקודה על פני הקרקע (כולל פני הים), יש נקודה ייחודית תואמת על פני אליפסואיד הייחוס. הקואורדינטה השלישית (גובה) נמדדת באופן טבעי מפני האליפסואיד. גובה זה שונה במהותו מהגובה מעל פני הים.

(ג) קואורדינטות מישוריות. לרוב מטרת המיפוי והמדדה הרגילות נוח להשתמש במיקום נקודה באמצעות קואורדינטות ישרות זווית x ו- y במישור באמצעות נוסחאות היטל כלשהו מהאליפסואיד.

המערכת המקובלת לחישובים גאודטיים היא מערכת (ב), בה המיקום של נקודה על הקרקע מתואר ע"י אורך ורוחב של הנקודה התואמת על אליפסואיד הייחוס שנבחר ואילו גובה הנקודה הוא גובה מעל פני הים (הגאואיד כפי שנראה בהמשך). מערכת קרטזית (א) משמשת בד"כ לחישובים של גאודזיה לוויינית. מערכת קואורדינטות מישוריות (ג) משמשת למדידות קדסטרליות, למדידות הנדסיות ולמיפוי טופוגרפי.

גאואיד ואליפסואיד

יש לקחת בחשבון שלושה משטחים:

(א) משטח פני הקרקע. זהו בקירוב כדור פחוס בצורת אליפסואיד, בעל רדיוס גדול של כ-6378 ק"מ ורדיוס קטן של כ-6357 ק"מ, אבל מקומית הוא עשוי לסטות בכמה קילומטרים מצורת האליפסואיד.

(ב) משטח פני הים הממוצעים או הגאואיד, הדומה הרבה יותר לאליפסואיד. הגאואיד ניתן לתיאור כמשטח שמתלכד באוקיינוסים עם פני הים הממוצעים, ונמצא מתחת לאדמה בגובה אליו היה מגיע הים אילו היתה מתאפשרת למימיו חדירה דרך תעלות חסרות חיכוך. יותר מדויק, זהו משטח שווה פוטנציאל של כוח המשיכה והסיבוב של כדור הארץ אשר מתלכד בממוצע עם פני הים הממוצעים באוקיינוס הפתוח. אם כדור הארץ היה בעצמו אליפסואיד מושלם ללא אנומליות פנימיות של צפיפות הקרקע, היה הגאואיד כמעט בדיוק זהה לאליפסואיד, אבל חוסר האחידות בצורה ובצפיפות גורם לגאואיד לסטות מהצורה המושלמת של האליפסואיד עד כמאה מטרים (פלוס ומינוס). הפרש הגובה בין הגאואיד לאליפסואיד בנקודה כלשהי מכונה גליות הגאואיד. גם בכיוון האנך הסטיות הן בד"כ כמה שניות של קשת, אך בשטח הררי הן עשויות להגיע עד דקה שלמה.

הגאואיד הוא ישות פיזיקלית. בגובה פני הים, כיוון כוח הכובד כמו גם ציר הסיבוב האנכי של תאודולט (מכשיר למדידת זוויות אופקיות ואנכיות), ניצבים לו, ובתהליך של איזון באמצעות מאזנת מפולסת נמדדים גבהים ביחס אליו. תצפיות אסטרונומיות שנערכו במכשירים שציר הסיבוב שלהם ניצב לגאואיד יכלו להגדיר קווי אורך או קווי רוחב, אבל אלה לא יכלו לשמש לחישובים גאודטיים מאחר וחוסר האחידות של צורת הגאואיד גרמה לאי אחידות שלהם. שני "קווי רוחב אסטרונומיים" כאלה המרוחקים 10000 מטרים באותו קו אורך עשויים להיות במרחק של 9900 מטרים בלבד לאורך קו אורך הנמצא קילומטרים ספורים מהקו הקודם.

(ג) אליפסואיד הייחוס. הגאואיד אינו מתאים מאחר והמיקום של נקודות על פני הקרקע חייב להיות מבוטא בקואורדינטות על משטח ייחוס המוגדר באמצעות צורה גאומטרית כלשהי. תיאורטית זה יכול להיות כדור, אבל זה מקובל ונוח יותר להשתמש בקווי אורך ורוחב של אליפסואיד כלשהו המייצג בקירוב את הגאואיד. חשוב להבין כי הגדרת אליפסואיד זה היא שרירותית וכי כל אליפסואיד יכול לשמש לכך. הבחירה הינה רק עניין של נוחיות.

הגדרת מערכת אליפסואיד הייחוס כוללת בחירת שמונה קבועים בלתי תלויים כלהלן:
(1) הציר הקטן מוגדר כמקביל לציר הסיבוב הממוצע של כדור הארץ, כיוון שנקבע ביחס לקרקע. הגדרה זו אקוויוולנטית לשני קבועים.

(2) נקבעים אורכים לציר הגדול ולציר הקטן, או לציר הגדול ולפחיסות (היחס בין ההפרש שבין הצירים לאורך הציר הגדול). אלה הם שני קבועים נוספים. נעשה בעולם שימוש בהרבה מאד ערכים שונים שדיוקם הלך והשתפר עם הזמן. אורך הציר הגדול של אליפסואיד Clarke (משופר) 1880 ששימש כאליפסואיד הייחוס של רשת ישראל ("הישנה") הוא 6378301, אורך הציר הקטן הוא 6356566 והפחיסות היא 1/293.47. אורך הציר הגדול של האליפסואיד GRS80 שנבחר לשמש כאליפסואיד הייחוס של רשת ישראל החדשה הוא 6378137 מטרים, אורך הציר הקטן הוא 6356752.3 והפחיסות היא 1/298.25722. ממדי האליפסואיד הבין-לאומי WGS84 המשמש את מערכת ה-GPS זהים מעשית לאלה של אליפסואיד זה.

(3) בהגדרת מרכז האליפסואיד מעורבים עוד שלושה קבועים. באופן אידיאלי, מרכז האליפסואיד צריך להיות במרכז הכובד של כדור הארץ, דבר שהיה בלתי אפשרי לביצוע עד עידן הגאודזיה הלווויינית. זאת מאחר שמודד שהציב תאודוליט בנקודה כלשהי לא היה מידע מדויק בדבר כיוון מרכז הכובד של כדור הארץ ולא היה באפשרותו לייחס את המדידה לכיוון זה. בהמשך יתואר איך נעשתה הגדרת מרכז האליפסואיד.

(4) האפס של האורך נקבע בקו שעובר במרידיאן של גריניץ'. זה אקוויוולנטי לקבוע השמיני.

(ד) התאמה חד-חד ערכית של נקודות על פני הקרקע לנקודות על האליפסואיד. זהו עניין נוסף הדורש הגדרה שרירותית. קווי האורך והרוחב מתארים את מיקום הנקודה על האליפסואיד, אבל נשאר להגדיר איזה נקודה על האליפסואיד תואמת את הנקודה על פני הקרקע במרחק כלשהו מעליו או מתחתיו. השיטה שאומצה היא זו שהוצעה ע"י הלמרט (Helmert) בשנת 1880. על פי שיטה זו, נקודה p על פני הקרקע תואמת לנקודה P על האליפסואיד אם היא נמצאת על הניצב לאליפסואיד בנקודה P . הגדרה זו מספקת את נוסחת החישוב הקלה ביותר. המילה ניצב (נורמל) מתייחסת לקו הניצב לאליפסואיד בנקודה כלשהי, ואילו אנך הוא כיוון כח הכובד - קו עקום הניצב לגאואיד ולמשטחים שווי פוטנציאל אחרים בנקודות שבהן הוא חותך אותם. המונח מישור אופקי מתייחס למישור המשיק למשטח שווה הפוטנציאל בגובה פני הקרקע.

הגדרת הקשר בין האליפסואיד לגאואיד לפני עידן הגאודזיה הלווויינית

כאמור לעיל, לפני עידן הגאודזיה הלווויינית היה בלתי אפשרי למקם את מרכז האליפסואיד במרכז הכובד של כדור הארץ. מיקום האליפסואיד ביחס לנקודות המדידה על פני הקרקע נעשה כלהלן:

בנקודה אחת, המכונה נקודת הראשית, הגדיר המודד באופן שרירותי את גובהה מעל האליפסואיד, את הרוחב הגאודטי (אליפסואידלי) ואת האזימוט הגאודטי מנקודת הראשית לנקודה אחרת. להגדרת גובה נקודת הראשית נוח לאמץ גובה שנקבע באמצעות איזון ביחס לפני הים הממוצעים, במקרה כזה הגאואיד והאליפסואיד מתלכדים בנקודה הנמצאת מתחת לנקודה זו. לרוחב ולאזימוט נוח לאמץ ערכי תצפיות אסטרונומיות לקביעת רוחב ואזימוט. במקרה כזה יהיה האליפסואיד שמתחת לנקודת הראשית מקביל למישור האופקי בנקודת הראשית. בנוסף, אמור המודד להגדיר את האורך הגאודטי בנקודת הראשית. האורך נקבע אף הוא באמצעות תצפיות אסטרונומיות ומדידה מדויקת של הזמן בו חוצים הכוכבים שניצפו את המצהיר (מרידיאן) המקומי, הנמצא באזימוט של אפס מעלות.

הערה: כללית יש הבדלים בין אורך, רוחב ואזימוט גאודטיים ואסטרונומיים הנובעים מסטיית האנך מהניצב (המכונה סטיית האנך). סטייה זו נגרמת הן כתוצאה מהשונות של כיוון כח הכובד ממקום למקום (הנגרמת עקב השינויים הטופוגרפיים וחוסר האחידות בצפיפות קרום כדור הארץ) והן כתוצאה מהבחירה השרירותית במיקום האליפסואיד ביחס לגאואיד בנקודת הראשית, כמתואר לעיל. קיים קשר ישיר (באמצעות משוואת Laplace) בין הבדלי האזימוטים והבדלי האורך (האסטרונומי והגאודטי), כך שלמעשה קביעה של האורך הגאודטי כמתלכד עם האורך האסטרונומי גורמת להתלכדות האזימוט הגאודטי עם האזימוט האסטרונומי. הגדרת ממדי האליפסואיד ומיקומו ביחס לגאואיד, כמתואר לעיל, מהווים את הדאטום הגאודטי.

בתקנות המודדים (מדידות ומיפוי), התשנ"ח – 1998 מוגדר המושג "דאטום" כלהלן: "הגדרת ממדיו וצורתו של האליפסואיד והגדרת מיקומו ביחס לגאואיד". התקנה הראשונה בפרק "רשת בקרה אופקית ואנכית" בתקנות הנ"ל (תקנה 5 (א)) אומרת: "המנהל יגדיר את ערכי הדאטום, את סוג ההיטל הגאודטי ואת רשת הקואורדינטות – שימשו בסיס לחישוב רשת בקרה אופקית". תקנות אלה נתנו גושפנקא חוקית למה שנעשה כמובן מאליו עוד בשנות העשרים של המאה הקודמת (בתקופת המנדט הבריטי על ארץ ישראל), ונעשה באותו אופן בכל מקום אחר בעולם, כפי שתואר לעיל.

מדידות גאודטיות מודרניות החלו בארץ ישראל בשנת 1921 על ידי מחלקת המדידות של ממשלת המנדט הבריטי. בסביבת קיבוץ אורים (אז אימרה) שבנגב המערבי נמדד קו בסיס באורך של כ- 4.7 קילומטרים בין נקודות 1M ו- 2M שהיוו את תחילת הטריאנגולציה הראשית של ארץ ישראל. בנקודה 2M נעשו תצפיות אסטרונומיות לקביעת רוחב ואזימוט. האורך לא נמדד, אלא נלקח מן הטריאנגולציה הארעית של הבריטים בסיני. הרוחב האסטרונומי נמדד בדיוק נמוך יחסית: 3.8 שניות (אקוויולנטי ל-117 מטרים) והאזימוט האסטרונומי של קו הבסיס נמדד בדיוק של 4.7 שניות. גובה הנקודה נקבע באמצעות איזון, על סמך גובה פני הים בנמל עזה. בכך הפכה נקודה 2M לנקודת הראשית בה משיק האליפסואיד לגאואיד, סטיית האנך בה היא אפס, והאזימוט האסטרונומי זהה לאזימוט הגאודטי. מנקודה זאת התפתחה רשת הטריאנגולציה הראשית שכללה 100 נקודות והשתרעה מבאר שבע בדרום ועד דן בצפון. לחישוב הקואורדינטות הגאודטיות (של אורך ורוחב) שימש כאמור האליפסואיד של קלרק הבריטי מ-1880. לצורך ביקורת על החישוב נמדד בסביבת צמח שמדרום לכנרת קו בסיס נוסף באורך של כ-2.9 ק"מ.

רשת ישראל

למערכת קואורדינטות מישוריות המשמשת למדידות קדסטרליות, למדידות הנדסיות ולמיפוי טופוגרפי נבחר ההיטל הגאודטי של קסיני - סולדנר. מטעמים של נוחיות החישוב נבחרו הקואורדינטות: $y=100000.00$; $x=100000.00$ לנקודה 5Md על גבעת עלי מונטר ליד עזה. משום מה הבריטים לא לקחו בחשבון שהנגב הדרומי נכלל בארץ ישראל (רשת הטריאנגולציה השתרעה כאמור רק צפונית לבאר שבע), ולכן הניחו כי לכל נקודות הרשת יהיו ערכים חיוביים. מטעמים של שמירה אופטימלית על קנה מידה וכן מטעמי נוחיות החישוב, נבחרה כנקודת מוצא להיטל (שדרכה עובר המרידיאן המרכזי של ההיטל) נקודת הטריאנגולציה 82M על גבעת ליד מנזר מר-אליאס, בין ירושלים לבית לחם. הקואורדינטות הגאודטיות (לעתים מכונות גם גאוגרפיות) של נקודה זו היו: אורך: $35^{\circ}12'43".490$; רוחב: $31^{\circ}44'02".749$; $y=170251.555$; $x=126867.909$ הקואורדינטות המישוריות שחושבו לנקודה היו: $y=170251.555$; $x=126867.909$ סוג ההיטל, הנקודה הראשית והקואורדינטות שלה, שהתקבלו כבחירה שרירותית, מהווים את הדאטום של מערכת הקואורדינטות המישוריות שנקראה רשת ישראל. לאחר קום המדינה הורחבה רשת הטריאנגולציה עד אילת. כדי להימנע מערכים שליליים נוספה תוספת של 1000 קילומטרים לקואורדינטות בכיוון X. כמו כן נמדד בעברונה, צפונית לאילת, קו בסיס באורך של 4.08 ק"מ ששימש לתיאום הרשת. בשנת 1966, עם תחילת השימוש במד הטווח האלקטרומגנטי טלורומטר למדידה ישירה של מרחקים ארוכים, התגלתה בחישוב קו בסיס זה טעות גסה של 0.87 מטר שגרמה לשגיאות גסות בקואורדינטות (בעיקר בציר X) של נקודות הטריאנגולציה בנגב הדרומי. כמו כן התגלתה שגיאה גסה של כ-11 שניות באזימוט אסטרונומי ששימש לתיאום הרשת, שגרמה לשגיאות גסות נוספות (בעיקר בציר Y).

רשת ישראל החדשה

רשת ישראל היתה בשימוש במשך כ-75 שנים, החל בתחילת שנות העשרים של המאה הקודמת ועד שנת 1998 בה התפרסמו תקנות מדידה חדשות שנתנו תוקף חוקי לרשת ישראל החדשה. הצורך במעבר לרשת חדשה היה הדיוק הלא מספק של רשת ישראל (המכונה עתה בסלנג "ישנה"), עם השיפור הטכנולוגי בתחום מדידה אלקטרומגנטית של מרחקים. לרשת ישראל החדשה (Adler and Papo) נבחר האליפסואיד הבין-לאומי GRS-80 (Geodetic Reference System) וההיטל הגאודטי מרקטור רוחבי עם מקדם קנה מידה ייחודי. הרשת נקראת ITM (Israel Transverse Mercator). בכדי למנוע בלבול בין הרשת הקודמת לרשת החדשה וכן כדי להסתפק בשש ספרות (למטרים) ולמנוע כמעט לחלוטין את האפשרות להתבלבל בין ציר y לציר x, נוספו לקואורדינטות 50 קילומטרים בכיוון מזרח (y) ו-500 קילומטרים בכיוון צפון (x). כנקודה הראשית של הרשת נבחרה נקודה פיקטיבית כ-700 מטרים מערבה לנקודה 82M, שכונתה 882M. כמו כן נבחר מקדם קנה מידה ייחודי של 1.0000067. בחירה זו נעשתה על מנת למזער את השינוי בקואורדינטות של הנקודות לפחות ממטר אחד (לא כולל ההזזה הגדולה של 50 ו-500 ק"מ) מצפון לבאר שבע, כך שלא יהיה צורך לשנות את רשתות הקואורדינטות על גבי המפות

הקיימות. נקודת הטריאנגולציה 2M נותרה כנקודת הראשית של הרשת (האורך והרוחב שלה לא השתנו). לתיאום הרשת נוספו תצפיות רבות של מרחקים שנמדדו במד מרחק לייזר, וכן עשרות תצפיות אזימוט – לפלאס (המבוסס על מדידת אורך, רוחב ואזימוט אסטרונומיים בנקודות טריאנגולציה בעלות אורך ורוחב גאודטי). דיוק הדרגה הראשית (נקודות M בדרגה 1 ו-2 שתואמו ביחד) ברשת זאת נאמד בכ- 5 ס"מ (סטיית תקן אחת), ודיוק נקודות דרגת הטריאנגולציה הנמוכה ביותר (דרגה 4) נאמד בכ- 10 ס"מ.

רשת ישראל 2005

עם התפתחות השימוש בגאודזיה לוויינית המאפשרת קבלת דיוק גבוה יותר מזה של רשת ישראל החדשה, נכנסה לתוקף החל מ-1.05.2007 רשת משופרת המבוססת על רשת התחנות הקבועות של GNSS המופעלות על ידי המרכז למיפוי ישראל – רשת ישראל 2005. לקואורדינטות המישוריות של רשת זו משמשים אותו אליפסואיד ואותן משוואות מיפוי (היטל גאודטי) של רשת ישראל החדשה, כך שזו למעשה רשת ישראל החדשה במתכונת משופרת. הבדלי קואורדינטות בין מדידה קודמת של נקודה כלשהי ברשת ישראל החדשה (שלא התבססה על הדאטום החדש של תחנות הקבע), לבין מדידת אותה נקודה ברשת ישראל 2005 הינם מסדר גודל של עד כ- 15 ס"מ. לפירוט יתר של רשת זו ראה בהמשך את המאמר של גלעד אבן-צור. להבדיל מעידן טרום הגאודזיה הלוויינית, מבוסס הדאטום הגאודטי של רשת זו על מערכת ה-GPS בה מרכז האליפסואיד מתלכד עם מרכז הכובד של כדור הארץ. כתוצאה מכך השתנו האורך והרוחב הגאודטיים בנקודות הרשת בכ- 2.5" ו- 1.5" בהתאמה.

גבהים

קיימים באופן כללי שני סוגי גבהים:

(א) **גובה אליפסואידלי**. גובה מעל פני האליפסואיד, כאמור בסעיף (ד) בפרק "גאואיד ואליפסואיד" לעיל, המוגדר כמרחק של הנקודה הנמדדת לאורך הניצב לאליפסואיד. זוהי הגדרה גאומטרית לחלוטין הנחוצה עקרונית לחישוב מדויק של מרחקים. כמובן שאין אפשרות למדוד גובה כזה באופן ישיר (הן מאחר לפני האליפסואיד אינם משטח נגיש והן מאחר ולא ניתן למדוד דרך הקרקע). עד עידן הגאודזיה הלוויינית לא היה ניתן למדוד במדויק גבהים אליפסואידליים או הפרשי גובה אליפסואידליים גם באופן בלתי ישיר, ולכן נעשה שימוש בגבהים מעל הגאואיד.

(ב) **גובה אורתומטרי**. הפרש גובה אורתומטרי מוגדר כאורך הנמדד לאורך האנך בין שני משטחים שווי פוטנציאל. גובה אורתומטרי מתייחס בדרך כלל לגובה מעל הגאואיד כמשטח ייחוס. בגובה זה נכלל מרכיב שאינו גאומטרי טהור והוא מבטיח עקרונית זרימת מים ממקום גבוה לנמוך, עניין בעל חשיבות גבוהה בעבודות הנדסיות. מובן כי גם מדידה ישירה של גובה אורתומטרי (דרך הקרקע) אינה אפשרית. גובה אורתומטרי נמדד בדרך עקיפה באמצעות תהליך של איזון גאומטרי או איזון טריגונומטרי על פני הקרקע. לשם קבלת דיוק גבוה מאד ברשת איזון (בקרה אנכית אורתומטרית) בדרגה העליונה, צריך לתקן את תוצאות המדידה (המאוד דקדקנית כשלעצמה) בעזרת מדידות של כוח הכובד.

דאטום לגבהים אורתומטריים

כאמור לעיל, משטח הייחוס למדידת גבהים אורתומטריים הוא בדרך כלל הגאואיד. לצורך מימוש הגאואיד במקום כלשהו מודדים באופן רציף את גובה פני הים ביחס לנקודת בקרה אנכית (benchmark) קרובה. פני הים נמדדים באמצעות מריאוגראף המותקן במים שקטים ומשכך את אפקט הגלים. עיקר השינויים בפני הים נובעים מתופעת הגאות והשפל הנגרמת על ידי כח המשיכה של השמש והירח ושינוי מחזורי במיקום נקודת המדידה ביחס אליהם. המשרעת (אמפליטודה) של הגאות והשפל משתנה בים הפתוח בהתאם לרוחב הגאוגרפי של הנקודה. בקרבת היבשה, במקום בו נמצאים מריאוגראפים, משתנה המשרעת כפונקציה של צורת הים, כיוונו והטופוגרפיה של קרקעיתו. במפרץ פנדי (Bay of Fundy) בדרום מזרח קנדה מגיעה המשרעת עד ל-16 מטרים. לחוף הים התיכון בישראל המשרעת הרגילה (לא בעת סערות בים) היא כ- 50 עד 70 ס"מ, ובאילת היא כ- 80 עד 120 ס"מ. בכל יממה בקירוב יש שני מופעים של גאות ושפל, שהמשרעת שלהם משתנה עם הזמן במחזוריות נוספת מורכבת של פעמיים בחודש, שנה ו-18.6 שנים בקירוב. לפיכך רצוי לקבוע את הדאטום האנכי האורתומטרי על סמך מדידות רציפות של 18.6 שנים. בנוסף לתופעה האסטרונומית של גאות ושפל משפיעים על גובה פני הים גורמים כמו שינויים בלחץ הברומטרי, רוחות, זרמי ים, משקעים מעל הים וכאלה הזורמים אליו, והתאיידות מי הים.

איזון מדויק מוגדר בהחלטה של הארגון הבין-לאומי לגאודזיה (IAG) משנת 1948, כאיזון הלוך וחזור עם סטיית תקן שאינה עולה על 3 מילימטרים לשורש הריבועי של אורך האיזון בקילומטרים. רשת של איזון מדויק מורכבת מלולאות גדולות (של מאות קילומטרים), לאורך כבישים או מסילות רכבת, הכוללות נקודות בקרה בצפיפות של 2-5 קילומטרים. כאשר מדובר על רשתות גדולות במדינות השוכנות לאורך הים, מקובל לקשור את הרשת ליותר ממריאוגראף אחד. קשר זה יכול לשמש לביקורת המדידה או אפילו לביסוס הרשת באמצעות יותר ממד-מפלס אחד. במקרה כזה נקבע הדאטום על ידי יותר ממריאוגראף אחד.

הדאטום לגבהים האורתומטריים לא חייב להתבסס על קשר ישיר למריאוגראף. אין מניעה כי מדינות שאינן שוכנות לחוף הים יחליטו על דאטום שרירותי כלשהו המבוסס על מדידה מקורבת של גובה מעל הגאואיד או מעל האליפסואיד. בעידן הגאודזיה הלוויינית ניתן לבסס את דאטום הגבהים האורתומטריים בהסתמך על דאטום הגבהים האליפסואידליים ומודל רשמי ("סטטוטורי") של גליות הגאואיד (שטינברג גרשון; אבן צור, שטינברג וטוצ'ין; Steinberg and Even-Tzur).

דאטום אנכי בישראל

הדאטום האנכי לחישוב רשת הטריאנגולציה של ישראל בתקופת המנדט הבריטי הוא, כאמור לעיל, גובה אורתומטרי שהובא באמצעות איזון גאומטרי מנמל עזה לקו הבסיס באימרה. יש להניח כי הדיוק של גובה זה ביחס לפני הים הממוצעים שנמדדו באותן שנים הוא מסדר גודל של סנטימטרים ספורים. לדיוק זה אין משמעות בחישובי הטריאנגולציה: שגיאה של 6.4 מטרים בגובה גורמת לשגיאה של אחד חלקי מליון במרחק (מילימטר לקילומטר), וזהו בערך הדיוק שהתקבל במדידת קו הבסיס.

הדאטום ששימש לרשת הבקרה האנכית (רשת האיזון המדויק ונגזרותיה) נקבע ב-1934 על סמך מדידת פני הים הממוצעים במשך כ-3 שנים בנמל חיפה. רשת האיזון המדויק שהחלה להתפתח בשנים אלו נפרשה לאחר קום המדינה לאורך כל הכבישים הראשיים.

בשנת 1965, לאחר שלש וחצי שנות פעולה של מריאוגרף שהותקן בנמל יפו נקבע מחדש מפלס פני הים הממוצעים. מפלס (דאטום) זה היה שונה בכ-10 ס"מ מזה שנקבע ב-1934.

בדצמבר 1997 הושלם תיאום חדש של רשת הבקרה האנכית על שלש דרגותיה. התיאום כלל 855 נקודות מדרגה 1, 1400 נקודות מדרגה 2 ו-4170 נקודות מדרגה 3 (המכונות "איזון דרגה ב"). הרשת תואמה באופן הירארכי בהתבסס על חמש שנים של מדידת פני הים בנמל אשדוד ("דאטום 1998"). תיאום 15 לולאות של הדרגה הראשונה, באורך כולל של 1060 ק"מ, הניב דיוק של 1.41 מ"מ לקילומטר (לפי שורש ריבועי של המרחק בקילומטרים). אומדן הדיוק של הדרגה השנייה, באורך כולל של 2306 ק"מ, הוא 2.80 מ"מ לק"מ. אומדן הדיוק של הדרגה השלישית, באורך כולל של 3835 ק"מ נע בין 6 ל-9 מ"מ לק"מ. כתוצאה של התיאום החדש חלו שינויים מסדר גודל של 5 ס"מ בגבהים לאורך מישור החוף, כ-11 ס"מ באזור הכנרת, ועד 20 ס"מ ברמת הגולן. השינוי נבע רק בחלקו משינוי הדאטום, אך חוסר האחידות בשינוי נבע בעיקר מכך שחישוב הגבהים הקודמים לא נעשה בתיאום כמקשה אחת.

הדאטום העתידי

בעקבות התפתחות הגאודזיה הלוויינית והדיוק הגבוה שהיא מאפשרת הן למדידת הפרשי מיקום אופקי והן למדידת הפרשי גובה, הוחלט במרכז למיפוי ישראל כי רשת הבקרה הגאודטית הארצית תהיה רשת תלת ממדית. לנקודות הרשת יוגדרו אורך ורוחב גאוגרפיים, קואורדינטות מישוריות ברשת ישראל החדשה וגבהים אליפסואידליים. הרשת מבוססת על תחנות הקבע של GNSS כמובא בהמשך ע"י אבן-צור. הדיוק האופקי של נקודות הבקרה בדרגה הנמוכה ביותר יהיה טוב מ-35 מ"מ באמינות סטטיסטית של 95%, ביחס לערכים הנומינליים של תחנות הקבע. דיוק זה יאפשר את מדידת, קביעת, ושחזור גבולות המקרקעין בדיוק של 5 ס"מ (95%). לכל נקודה ייקבע גם גובה אליפסואידלי בדיוק הנע בין 10 מ"מ ל-10 ס"מ.

המרכז למיפוי ישראל לא ימשיך לתחזק רשת של איזון מדויק. גבהים אורתומטריים ייקבעו על פי הצורך בדאטום מקומי על פי (Steinberg and Papo 1996, 1998, 1999). דאטום גבהים ארצי לגבהים אורתומטריים ייקבע על סמך דאטום הגבהים האליפסואידליים (של תחנות הקבע) ומודל גליות רשמי (סטטוטורי).

מקורות

אבן-צור גלעד, שטינברג גרשון וטוצ'ין יעקב. מודל גליות סטטוטורי כבסיס לקבלת הפרש גובה אורתומטרי ממדידות GPS. גיאודזיה, מיפוי ומידע גיאוגרפי, תל-אביב, מרץ 2006.

שטינברג גרשון, עדכון תקנות המודדים (מדידה ומיפוי), התשנ"ח-1998 – מגמות וכיוונים. גיאודזיה, מיפוי ומידע גיאוגרפי, יום עיון לזכרו של פרופ' בנימין שמוטר, הטכניון, ינואר 2005.

Adler, R. and Papo, H.B. (1984). Change of Projection Following Readjustment. The Cartographic Journal, Vol. 22, pp. 138-140.

Steinberg G. and Even-Tzur G. (2007). Official Geoid Undulations Model. GIM International, February 2007.

Steinberg G. and Even-Tzur G. (2006). Permanent GNSS Networks and Official Geoid Undulations Model as a Substitute for Orthometric Control. XXIII International FIG Congress, 8-13 October 2006, Munich, Germany.

Steinberg G. and Papo H. (1999). The Future of Vertical Geodetic Control. Geodesy and Surveying in the Future, The Importance of Heights, March 15-17 1999, Gavle, Sweden.

Steinberg and Papo (1998). "Ellipsoidal heights: The future of Vertical Geodetic Control". GPS world, Vol. 9, No.2, pp. 41-43, 1998.

Steinberg and Papo (1996). "Vertical Geodetic Control of the Future". Geoinformatics '96, Wuhan International Symposium, Wuhan, China, 10.1996.