

حساب انحرافات الشبكة الارتفاعية السورية عن الجيويدي العالمي EGM2008 باستخدام حقل الجاذبية الأرضية الناظمي

الدكتور نديم ديوب*

الدكتور فايز ديب**

(تاريخ الإيداع 12 / 1 / 2012. قُبِلَ للنشر في 3 / 3 / 2013)

▽ ملخص ▽

إن التطور الحالي في نظام التموضع الجغرافي العالمي وتقنيات رصد الأقمار الصناعية وطرق المعالجة الرياضية الحاصلة خلال الثلاثين عاما الأخيرة أدى إلى ثورة حقيقية في تطوير نماذج حقول الجاذبية الأرضية. بالإضافة إلى ذلك فإن زيادة نسبة المناطق المغطاة بقياسات الجاذبية الأرضية أدى إلى زيادة في تفصيلات ودقة هذه النماذج. هذا بدوره أدى إلى تحسن ملحوظ في حسابات سطوح الجيويدي الضرورية لتحويل الارتفاع الجيودي إلى ارتفاع أورتومتري. يعرض هذا البحث طريقة توظيف حقل الجاذبية الناظمي في حساب انحرافات الشبكة الارتفاعية السورية عن الجيويدي العالمي EGM2008 المعرف بجهد الأرضي $W_0=62636856.0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. تعتمد هذه الطريقة على حساب متوسط انحرافات قيم الجهد الأرضي عند مجموعة نقاط المعلومة المنسوب والارتفاع الإلهيلجي في بعض المناطق السورية. تم حساب الجهد الأرضي في منطقة البحث باستخدام النموذج العالمي للجاذبية الأرضية EGM2008. لقد تم الحصول على فروقات بين الجهد الأرضي الفعلي والجهد الأرضي عند السطح المرجعي للشبكة الارتفاعية السورية في المجال من $[-4.51 \text{ m}^2\text{s}^{-2} \sim -10.62 \text{ m}^2\text{s}^{-2}]$ بقيمة متوسطة $6.72 \pm 0.70 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ بموثوقية 95% وهذا موافق لـ $[-46.0 \text{ cm} \sim -108.4 \text{ cm}]$ والقيمة المتوسطة $-69.7 \pm 7.1 \text{ cm}$. هذا يعني أن السطح المرجعي الارتفاعي السوري يتوضع أسفل الجيويدي العالمي.

الكلمات المفتاحية: الجاذبية الارضية، سطح تساوي الجهد، الارتفاع الأورتومتري، الارتفاع الإلهيلجي، الارتفاع الجيويدي.

* مدرس - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Estimating Offsets the Syrian Height Datum and the EGM2008 Geoid using the Normal Gravity Field

Dr.NadimDayoub*

Dr Fayez Deeb**

(Received 12 / 1 / 2012. Accepted 3 / 3 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

Within the last thirty years, the recent development in GPS, satellite tracking techniques and processing strategies has revolutionized development of Earth gravity field models. In addition, the increase of gravity data coverage led to an increase in the resolution and accuracy of these models. This in turn led to a noticeable improvement in determination of geoid surfaces which are essential in transformation of the geodetic height to the orthometric height. This study utilizes the normal gravity field for estimating offsets the Syrian leveling network from the EGM2008 geoid defined by its geopotential value $W_0=62636856.0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$. This approach uses the average of the gravity potential values at the GPS/levelling points in some areas in Syria. The gravity potential value in the study region is estimated using the Earth gravity field model EGM2008. The residuals between the actual gravity potentials and the values at the Syrian height reference surface are estimated in the range between $[-4.51 \text{ m}^2\text{s}^{-2} \sim 10.62\text{m}^2\text{s}^{-2}]$ and a mean value of $-6.72\pm 0.70 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ with 95% confidence level. This corresponds to $[-46.0 \text{ cm} \sim 108.4 \text{ cm}]$ and a mean value of $-69.7\pm 7.1 \text{ cm}$ which means that the Syrian height datum is located underneath the global geoid.

Keywords: Earth gravity, equipotential surface, Orthometric height, ellipsoid height, Geoid height.

*Assistant professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

مقدمة :

يعتمد تقدير انحرافات السطوح الارتقاعية المرجعية عن السطح الارتقاعي المرجعي العالمي على حساب فروقات الجهد الأرضي عند النقاط الصفرية لمحطات قياس سطح البحر التي تم استخدامها لتأسيس المرجع الارتقاعي. حيث يتم هذا بطرح قيمة الجهد الأرضي العالمي W_0 من قيمة الجهد الأرضي المقدر عند محطة قياس سطح البحر (W_p). حيث يتم حساب الجهد الأرضي باستخدام نموذج للجاذبية الأرضية مثل النموذج EGM2008 [1]. هناك طريقة أخرى تم تطويرها من قبل [2] تستخدم بالإضافة إلى حقل الجاذبية الفعلي حقل الجاذبية الناظمي وتسمى طريقة القيمة للجهد الأرضي. تعتمد هذه الطريقة على حساب القيمة الوسطية لانحرافات قيم الجهد الأرضي عند مجموعة نقاط معلومة الارتفاع الفيزيائي والنتائج عن قياسات التسوية وتصحيحات الجاذبية الأرضية والارتفاع الجيوديزي الذي يعطيه نظام الـ GPS والتي تغطي منطقة كبيرة بشكل يتناسب معدقة وتفصيلات نموذج الجاذبية الأرضية. وقد استخدم [3، 4، 5] هذه الطريقة لحساب انحرافات السطوح المرجعية في أوروبا وأستراليا وأمريكا الشمالية.

تعتمد طريقة القيمة للجهد الأرضي على المبدأ القائل إن قيمة الجهد الأرضي الفعلي الناتج عن الكتلة الأرضية عند نقطة، على سطح الأرض يجب أن يساوي قيمة الجهد الناظمي الناتج عن إهليلج الدوران عند النقطة المقابلة لها على سطح التيلوريويد [6]. ولكن معظم السطوح الارتقاعية المرجعية تمثل سطح البحر الوسطي المحلي أو الإقليمي وليس الجيويويد العالمي الممثل بالقيمة W_0 وهذا بالتالي يسبب انحرافاً يقدر بالفرق بين قيمة الجهد الناظمي على سطح التيلوريويد والجهد الأرضي عند مجموعة النقاط المعتمدة. إن هذه الطريقة مناسبة للنظام الارتقاعي الناظمي، وهنا يجب مراعاة نوعية النظام الارتقاعي المحلي المستخدم في المنطقة المدروسة سواء كان النظام الأورثومتري أم الناظمي أو الناظمي - الأورثومتري. يمكن الإطلاع بشكل موسع على الأنظمة الارتقاعية وطريقة الحصول عليها من [7].

إن من سليات الشبكة الارتقاعية السورية (شبكات التسوية) أنها غير مصححة لفروقات الجاذبية الأرضية وبالتالي لا يمكن اعتبار النظام الارتقاعي السوري موافقاً لأي نظام من الأنظمة الارتقاعية المعتمدة عالمياً وهذا يخلق فروقات بسيطة تزداد بزيادة الارتفاع. وبسبب عدم توفر معلومات عن مسارات التسوية أو عن تصحيحات الجاذبية الأرضية في المنطقة المدروسة سنعتبر أن منسوب النقطة موافق للارتفاع الناظمي وسنشير إلى تأثير ذلك على النتائج إذا أمكن. في هذا البحث سنقوم بحساب انحرافات الشبكة الارتقاعية السورية عن السطح الارتقاعي المرجعي العالمي EGM2008 بالاعتماد على حساب فروقات الجهد الأرضي عند مجموعة النقاط المعلومة الارتفاع الناظمي (المنسوب) والارتفاع الجيوديزي المقاس بالـ GPS.

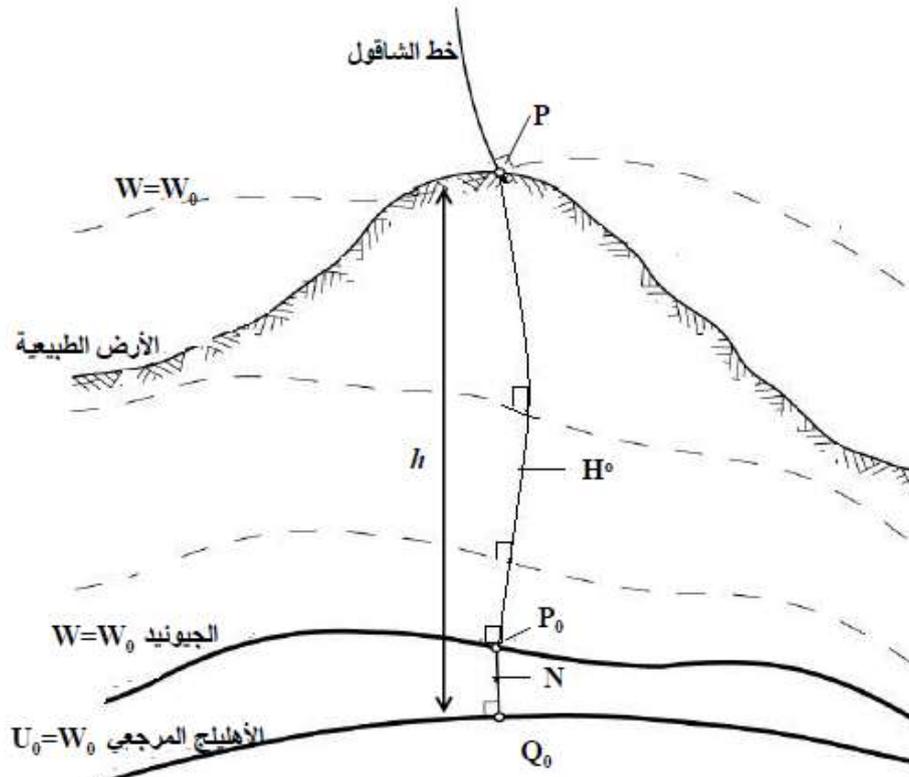
أهمية البحث وأهدافه :

يُعدّ الارتفاع الجيوديزي (h) الذي يعطيه نظام تحديد المواقع العالمي GPS غير مهم فيزيائياً حيث لا يعطي أي فكرة عن جريان المياه وغالباً لا يمكن الإعتماد عليه في حساب الفروقات الارتقاعية. لكنه يصبح أكثر فائدة في معظم التطبيقات الهندسية والمساحية المختلفة عند تحويل هذا الارتفاع إلى ارتفاع منسوب إلى أحد الارتفاعات الفيزيائية الأخرى وخاصة الارتفاعين الأورثومتري (H^0) والناظمي (H^N) والذين يمكن الحصول عليهما ضمن تقريب معين بحساب قيم انفصال الجيويويد (N) والشذوذ الارتقاعي (N) في المنطقة المدروسة وذلك باستخدام أحد نماذج الجيويويد العالمية حسب العلاقة 1 الموضحة في الشكلين 1 و 2:

$$h = N + H^o = \zeta + H^N \quad (1)$$

عادةً يوجد انحراف بين السطوح الارتقاعية المرجعية المحلية و سطوح الجيويدي العالمية لأن معظم السطوح الارتقاعية المرجعية منسوبة إلى سطوح البحر الوسطية المحلية بينما تؤسس الجيويديات العالمية بالاعتماد على سطح البحر الوسطي العالمي حيث يختلف سطح البحر الوسطي من مكان إلى آخر عالمياً بمقدار $(\pm 2m)$ حسب [8، 9]. وبالتالي فإن توحيد السطوح الارتقاعية المرجعية عالمياً واستخدام سطوح الجيويدي العالمية محلياً بحاجة إلى معرفة قيم هذه الانحرافات.

يهدف البحث إلى حساب انحرافات الشبكة الارتقاعية السورية عن سطح الجيويدي المرجعي العالمي EGM2008 بالاعتماد على حساب فروقات الجهد الأرضي عند مجموعة النقاط المعلومة الارتقاع الناظمي (المنسوب) والارتفاع الجيويديزي المقاس بالـ GPS والتي تغطي منطقة الدراسة. كما يهدف البحث إلى إعطاء فكرة عن كفاءة استخدام النموذج العالمي EGM2008 في تحويل الارتفاعات الجيويديزية المعطاة بنظام GPS إلى ارتفاعات ناظرية في حال عدم توفر نموذج جيويدي دقيق في منطقة القياس.



الشكل 1: الارتفاع الأرثومتري والجيويدي.

طرائق البحث ومواده :

طريقة القيمة للجهد الأرضي:

تعتمد طريقة القيمة للجهد الأرضي على نظرية مولودينسكي [6] والتي تقول: إن الجهد الأرضي الفعلي لنقطة على سطح الأرض (W_P) يساوي الجهد الأرضي الناظمي لنقطة موائمة لها على سطح التيليورويد (U_Q) حسب الشكل 2 حيث يشير H^N إلى الارتفاع الناظمي للنقطة P .

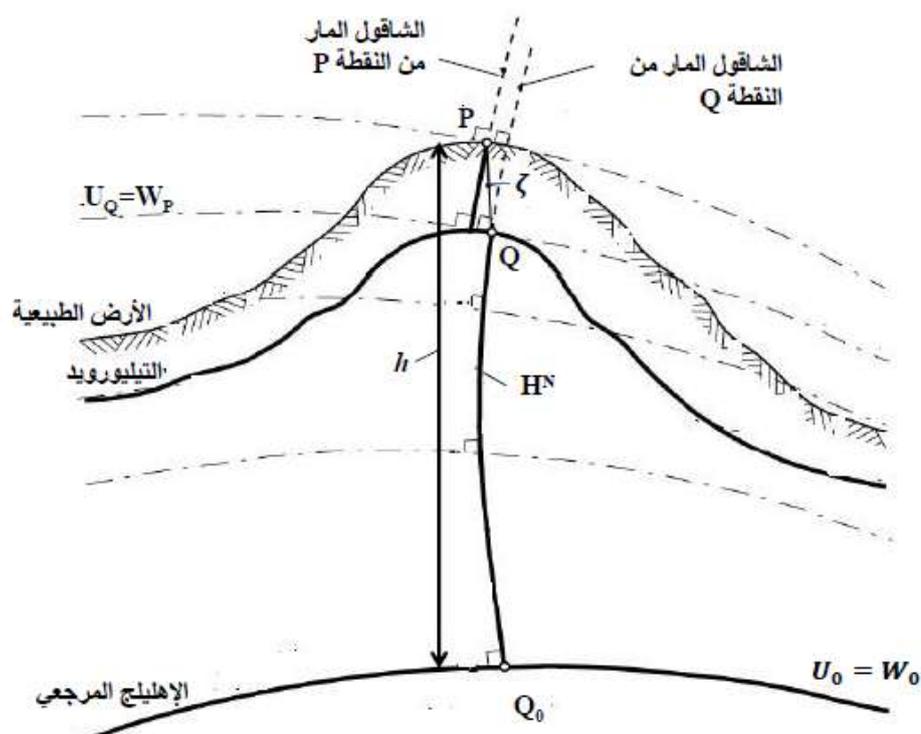
$$W_P = U_Q \quad (2)$$

يمكن حساب الجهد الأرضي عند النقطة P باستخدام نموذج لحقل الجاذبية الأرضية ذو درجة n ومرتبة m

في المعادلة 3 من [10]:

$$W(\theta, \lambda, r) = V(\theta, \lambda, r) + \Phi(\theta, r) \quad (3)$$

حيث إن θ, λ, r هي الإحداثيات الكروية المركزية، V يمثل الجهد الجاذب ويمكن حسابه من العلاقة 4:



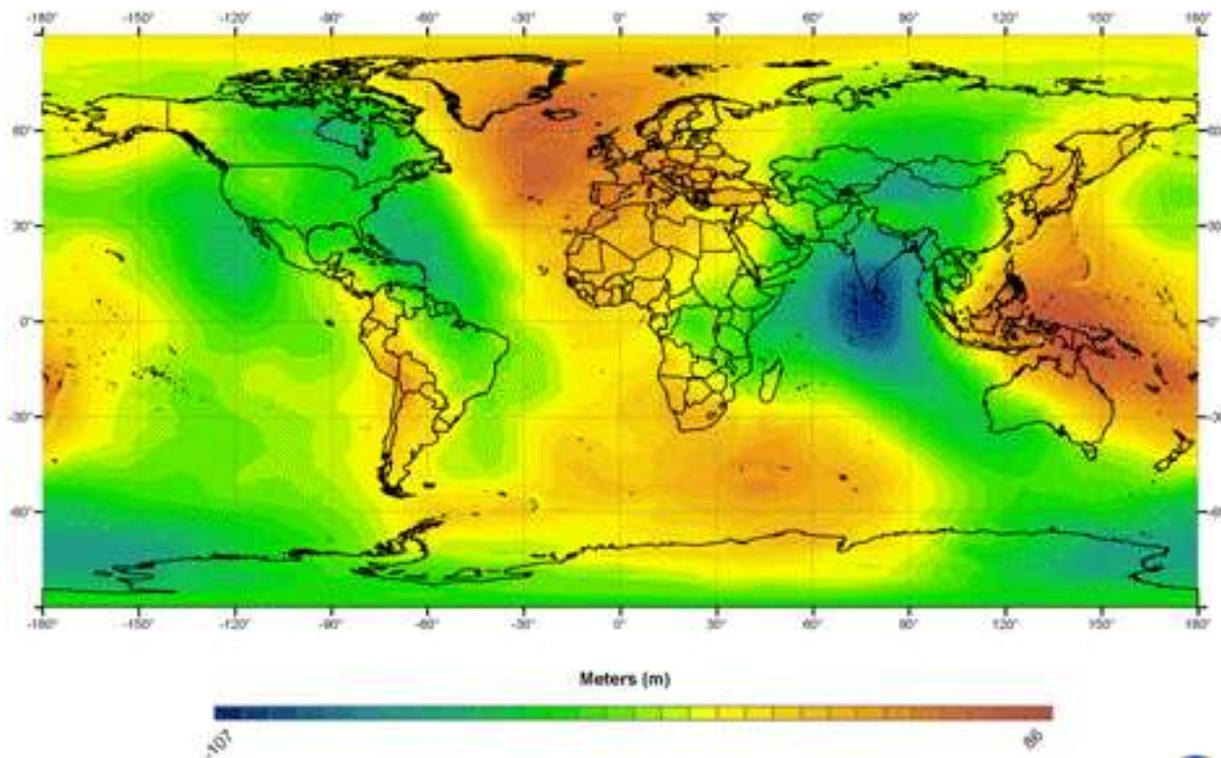
الشكل 2: الارتفاع الناظمي والتيليورويد.

$$V(\theta, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n P_{nm}(\cos \theta) (\bar{C}_{nm} \cos m\lambda + \bar{S}_{nm} \sin m\lambda) \right) \quad (4)$$

بينما يمثل Φ الجهد النابذ ويحسب من 5:

$$\Phi(\theta, r) = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (5)$$

معاملات جاذبية ارضية حتى الدرجة/المرتبة 2159/2159 (معامل 4665600) وقد تم تمديده حتى الدرجة 2190 ليغطي جميع العناصر أكبر من 19km [1] وهذا يعتبر تطوراً ملحوظاً مقارنة مع سابقه EGM96 [12] والذي يغطي العناصر الأكبر من 55km. أنشئ هذا النموذج من معلومات الجاذبية الأرضية الصادرة عن مهمة الجاذبية الأرضية الفضائية GRACE [13] ومن بنك المعطيات لشذوذات الجاذبية الأرضية المفصلة بتباعد 5' x 5'. وقد تم اختبار هذا النموذج بنجاح في عدد كبير من الدول، ويمكن الاطلاع على نتائج الاختبار في الموقع الرسمي المنظمة العالمية للجيوئيد [14] كما أن معاملات ال EGM2008 متوفرة مجاناً من هذا الموقع.



الشكل 3: انفصال الجيوئيد EGM2008 بالنسبة للإهليلج WGS84 من [14]

تستخدم نماذج الجاذبية الأرضية في حساب انفصال الجيوئيد من أجل استنتاج الارتفاعات الاورثومتريّة المنسوبة إلى سطح الجيوئيد من الارتفاعات الجيوديزية المأخوذة بنظام تحديد المواقع العالمية GPS وذلك في حال عدم توفر نموذج جيوئيد محلي للمنطقة. وبشكل واضح فإن استخدام النموذج EGM2008 يزيد من دقة الجيوئيدات الناتجة عنه مقارنة مع سابقه الأقل دقة وتفصيلاً وذلك لأنه يوفر عدد أكبر من المعاملات لاستخدامها في المعادلة 4. لكن ذلك لا يعني اعتماده في أي منطقة قبل اختبار مدى كفاءته وأدائه في المنطقة المذكورة. ويبين الشكل 3 انفصال الجيوئيد العالمي EGM2008 عن الإهليلج المرجعي WGS84.

النتائج والمناقشة :

من أجل حساب انحرافات الشبكة الارتفاعية السورية عن سطح الجيوئيد العالمي EGM2008 تم استخدام مجموعة من النقاط المعلومة المنسوب (أطلقنا عليها اصطلاحاً هنا الارتفاع الناظمي) المحسوب بالتسوية والارتفاع

الجيوإيزي المقاس بنظام الـ GPS في منطقة البحث. تمتد منطقة البحث من بانياس على الساحل السوري الى مدخل دمشق مروراً بحمص كما هو مبين في الشكلين 4 و 5. وقد تم الحصول على أرساد الـ GPS من الشركة السويسرية للدراسات الهندسية IBG التي قامت بدراسة جر مياه الساحل إلى دمشق. تم تعيين الارتقاعات الجيوإيزية لهذه النقاط في جملة الإحداثيات العالمية WGS84 بدقة 1cm للمركبة الأفقية و 2cm للمركبة الشاقولية. إن جميع النقاط المرصودة بنظام الـ GPS معلومة المنسوب في الجملة الارتقاعية السورية المنسوبة إلى الروبير الصفري (قيمة المنسوب تساوي الصفر) الموجود على شاطئ البحر في منطقة مينة البيضا شمال اللاذقية. يعرض الجدول 1 الارتقاعات الجيوإيزية والناظمية لنقاط الدراسة والفرق بينهما والذي يعطي الشذوذ الارتقاعي حسب المعادلة 1 والشكل 2 وقد رتبنا النقاط تصاعدياً حسب الارتفاع الناظمي. ومن الجدول نلاحظ أن الشذوذ الارتقاعي في منطقة الدراسة يتراوح ما بين 23.633m و 26.038m بقيمة وسطية $24.205 \pm 0.258m$.

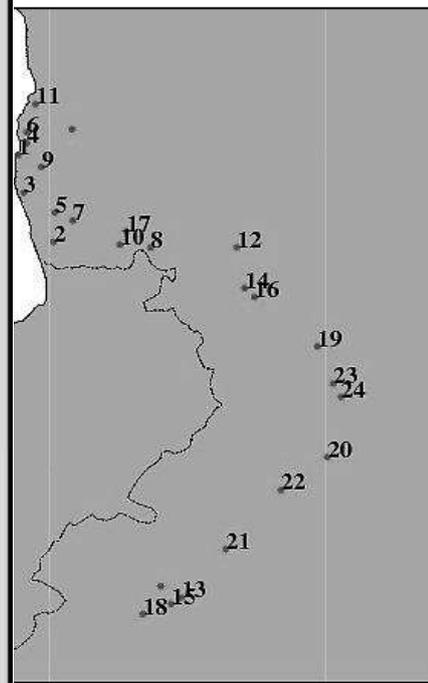
الجدول 1: الارتقاعات الجيوإيزية والناظمية لنقاط البحث.

No.	h (m)	$H^N(m)$	$\zeta=h-H^N(m)$
1	40.623	17.360	23.263
2	82.169	58.470	23.699
3	95.524	72.470	23.054
4	97.427	73.840	23.587
5	138.900	114.670	24.230
6	210.275	186.320	23.955
7	246.923	223.290	23.633
8	261.456	237.090	24.366
9	312.278	287.340	24.938
10	349.229	325.310	23.919
11	374.328	349.520	24.808
12	403.579	379.620	23.959
13	547.829	523.250	24.579
14	637.755	614.070	23.685
15	651.186	626.910	24.276
16	666.217	642.580	23.637
17	702.665	678.190	24.475
18	728.789	703.870	24.919
19	755.140	731.100	24.040
20	895.300	871.530	23.770
21	913.745	889.510	24.235

22	915.786	891.360	24.426
23	926.928	901.780	25.148
24	949.965	926.290	23.675
Avg			24.205±0.258
Max			26.038
Min			23.633



الشكل 4: خريطة الجمهورية العربية السورية محدد عليها منطقة البحث.



الشكل 5: منطقة ونقاط البحث.

لحساب انحراف السطح المرجعي السوري الارتفاعي عن الجيويدي العالمي EGM2008، نعتمد القيمة :
 المقترحة من قبل [4 ، 15 ، 16] كقيمة للجهد الأرضي للجيويدي العالمي. إن قياسات الـ GPS منسوبة إلى الإهليج العالمي WGS84 ذي المعاملات a, b, ω ولكن الجهد الناظمي على سطح هذا الإهليج هو $U_0 = 62636851.71 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ لا يساوي W_0 حسب الشكل 2. وبالتالي يجب اعتبار هذا الفرق ضمن المعادلة (8) لتصبح بالشكل التالي

$$dW_{0,L} = W_L - W_0 = W_P - U_Q - (W_0 - U_0) \quad (11)$$

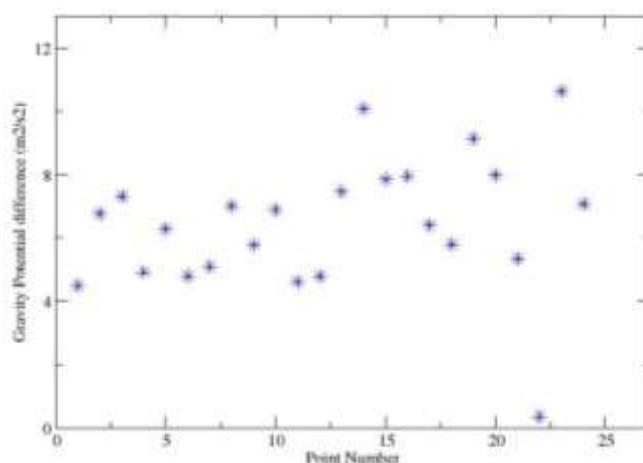
تم حساب قيم الجهد الأرضي على سطح الأرض عند النقاط المعتمدة باستخدام المعادلات 3 و 4 و 5 وتوظيف جميع معاملات نموذج الجاذبية الأرضية EGM2008. بينما تم حساب الجهد الناظمي عند النقاط الموافقة على سطح التيلورويد باستخدام المعادلة 6. وقد حسبت الجاذبية الوسطية من المعادلة 10 ثم تم حساب الانحرافات بعد ذلك باستخدام 11 و 9.

يبين الجدول 2 قيم الجهد الناظمي على سطح التيلورويد U_0 وقيم الجهد الفعلي على سطح الأرض W_P وتسارع الجاذبية الوسطية الناظمية بالإضافة إلى انحرافات السطح الارتقاعي المرجعي المحلي عن الجيويدي العالمي EGM2008 معطاة كفروقات بالجهد الأرضي بوحدة m^2s^{-2} وأيضاً كفروقات إرتقاعية بالسنتيمتر. يوضح الجدول المذكور أن السطح الارتقاعي المرجعي في سوريا ينحرف وسطياً عن الجيويدي العالمي EGM2008 المعروف بالقيمة $W_0=62636856.0 m^2s^{-2}$ بمقدار $6.72 \pm 0.70 m^2s^{-2}$ و الموافق لـ $69.7 \pm 7.1 cm$ وهذا يعني أن السطح المرجعي المحلي يتوضع أسفل الجيويدي العالمي بحوالي 70 cm. إن القيمة الموافقة للنقطة 23 أعتبرت شاذة كونها تبتعد عن القيم الأخرى بشكل كبير ويمكن أن يكون هذا عائداً إلى عدم دقة في التسوية الارتقاعية. على الرغم من وجود فرق كبير نسبياً بين الإنحرافين الأعظمي والأصغري $[-46cm, -108.4cm]$ إلا أن 80% من النتائج تقع ضمن المجال $[45-85cm]$ أو $[4.5-8.5m^2s^{-2}]$ كما يظهر في الشكلين 6 و 7 وأن جميع النتائج خارج هذا المجال موافقة لإرتقاعات أكبر من 600m والذي يمكن تفسيره بشكل جزئي إلى الأخطاء الناتجة عن إهمال تصحيحات الجاذبية الأرضية. إن قلة الدقة نسبياً للانحراف الوسطي الممثلة بالانحراف المعياري المرافق ناتجة من عدة مصادر للأخطاء ومنها كفاءة نموذج الجاذبية الأرضية EGM2008 ودقته، أخطاء المركبة الارتقاعية لقياسات الـ GPS، أخطاء التسوية الارتقاعية وإهمال تصحيحها لفروقات الجاذبية الأرضية بالإضافة إلى هبوطات القشرة الأرضية المحلية والحركات التكتونية.

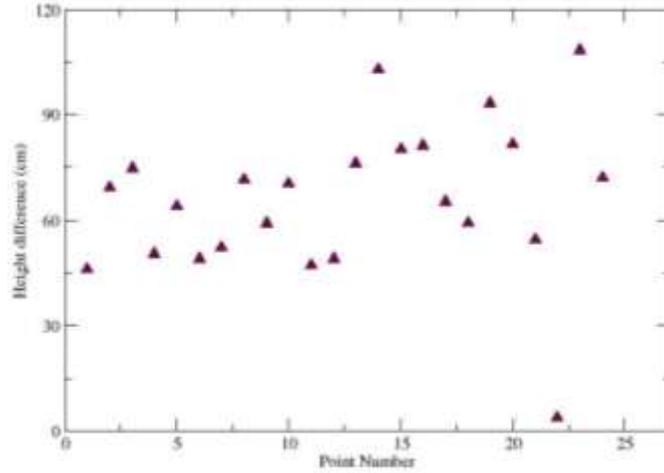
الجدول رقم 2- الجهد الأرضي الفعلي والجهد الأرضي على السطح المرجعي

No.	W_P (m^2s^{-2})	U_0 (m^2s^{-2})	$dW_{0,L}$ (m^2s^{-2})	$\bar{\gamma}$ (ms^{-2})	$dH_{0,L}$ (cm)
1	62636690.43	62636681.63	4.51	9.79726564	-46.0
2	62636289.96	62636278.88	6.79	9.79697052	-69.3
3	62636153.34	62636141.72	7.33	9.79707906	-74.8
4	62636137.51	62636128.29	4.94	9.79721112	-50.4
5	62635036.92	62635026.36	6.28	9.79685173	-64.1
6	62634673.23	62634664.13	4.81	9.79700859	-49.1
7	62634538.39	62634528.99	5.11	9.79675141	-52.2
8	62634048.05	62634036.75	7.01	9.79660238	-71.5
9	62633674.80	62633664.72	5.79	9.79675845	-59.1
10	62633438.81	62633427.62	6.89	9.79651376	-70.4
11	62633141.54	62633132.62	4.62	9.79684271	-47.2
12	62631734.90	62631725.81	4.80	9.79623947	-49.0

13	62630848.52	62630836.77	7.46	9.79516540	-76.1
14	62630724.88	62630710.50	10.09	9.79597044	-103.0
15	62630569.69	62630557.55	7.85	9.79510341	-80.2
16	62630220.48	62630208.23	7.96	9.79586642	-81.3
17	62629967.26	62629956.58	6.40	9.79600338	-65.3
18	62629700.70	62629690.61	5.81	9.79493974	-59.3
19	62628328.09	62628314.67	9.13	9.79543668	-93.2
20	62628151.11	62628138.83	7.99	9.79511372	-81.6
21	62628130.56	62628120.93	5.34	9.79486587	-54.6
22	62628023.41	62628018.74	0.38	9.79500716	-3.9
23	62627793.34	62627778.44	10.62	9.79525292	-108.4
24	62626914.17	62626902.81	7.07	9.79507920	-72.2
Avg			6.72±0.70		-69.7±7.1
Max			10.62		-108.4
Min			4.51		-46.0



الشكل 6: فروقات الجهد الأرضي بين EGM2008 والسطح الارتفاعي المحلي.



الشكل 7: الفروقات الارتقاعية بين EGM2008 والسطح الارتقاعي المحلي.

الاستنتاجات والتوصيات :

تم في هذا البحث حساب انحرافات السطح الارتقاعي المحلي المرجعي المستخدم في سوريا عن سطح الجيوييد العالمي EGM2008 المعرف بقيمة جهده الأرضي $W_0=62636856.0 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ باستخدام حقل الجاذبية الناظمي. وقد أظهرت الدراسة التحليلية للنتائج أن السطح الارتقاعي المرجعي السوري ينحرف وسطياً عن الجيوييد العالمي لنموذج الجاذبية الأرضية EGM2008 بمقدار $-69.7 \pm 7.1 \text{ cm}$ بموثوقية 95%. وهذا يعني بشكل عام أن السطح الارتقاعي المحلي السوري يتوضع تحت سطح الجيوييد العالمي بحوالي 70 cm.

يمكن استخدام سطح الجيوييد العالمي EGM2008 كسطح مقارنة للأعمال المساحية التي لا تتطلب دقة عالية شريطة الأخذ بعين الاعتبار انحرافه عن السطح المرجعي المحلي.

بفضل إجراء هذا البحث باستخدام عدد أكبر من النقاط موزعة بشكل جيد على مساحة أوسع وأكثر انتشاراً وذلك للحصول على نتائج أكثر موثوقية تأخذ بالحسبان الأخطاء التراكمية لمسارات التسوية الارتقاعية.

المراجع :

- 1-Pavlis, N., Kenyon, S., Factor, J. and Holmes, S. (2008) 'Earth gravitational model 2008', in SEG Technical Program Expanded Abstracts. Vol. 27 , 761-763.
- 2-Burke KF, True SA, Burša M, Raděj K (1996) Accuracy estimates of geopotential models and global geoids. In: Rapp RH, Cazenave AA, Nerem RS (eds) Proceedings of Symposium No 116 held in Boulder, CO, USA, July 12, 1995. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 50-60
- 3-Burša M, Kouba J, Kumar M, Müller A, Radej K, True SA, Vatrč V, Vojtíšková M (1999b) Geoidal geopotential and world height system. Studia Geoph Geod 43:327-337
- 4-Burša M, Kouba J, Müller A, Raděj K, True SA, Vatrč V, Vojtíšková M (2001) Determination of geopotential differences between local vertical

- datums and realization of a world height system. *Stud GeophGeod* 45:127-132
- 5-Burša M, Kenyon S, Kouba J, Raděj K, Vatrt V, Vojtíšková M, Šimek J (2002) World height system specified by geopotential at tide gauge stations. *Proceedings of IAG Symposium, Vertical reference system, Cartagena, Colombia, February 20-23, 2001, Springer Verlag, 291–296*
- 6-Molodensky MS, Yeremeev VF, Yurkina MI (1960) *Methods for study of the external gravitational field and figure of the Earth. TRUDY TsNIIGAIK, 131, Geodezizdat, Moscow. English translation.*
- 7-Jekeli, C. (2000) 'Heights, the Geopotential, and Vertical Datums', *Geodetic Science and Surveying, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University, Columbus, OH, Report.*
- 8- Rapp, R. H. (1994) 'Separation between reference surfaces of selected vertical datums', *Journal of Geodesy, 69, (1), 26-31.*
- 9- Rapp, R. (1995) 'A World vertical datum proposal', *Allg. Verm.Nachr, 102, 297-304.*
- 10-Heiskanen WH, Moritz H (1967) *Physical geodesy. WH Freeman and Co, San Francisco*
- 11-Hofmann-Wellenhof, B. and Moritz, H. (2006) *Physical geodesy. Vienna: Springer Verlag.*
- 12-Lemoine, F. G., Kenyon, S. C., Factor, J. K., Trimmer, R. G., Pavlis, N. K., Chinn, D. S., Cox, C. M., Klosko, S. M., Luthcke, S. B. and Torrence, M. H. (1998) 'The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency(NIMA) Geopotential Model EGM 96', NASA, (19980218814).
- 13- Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, and C. Reigber (2004), *The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results, Geophys. Res. Lett., 31, L09607, doi:10.1029/2004GL019920.*
- 14-<http://earth-info.nga.mil/GandG/>
- 15-Burša, M., Kenyon, S., Kouba, J., Šíma, Z., Vatrt, V. and Vojtíšková, M. (2004) *A Global Vertical Reference Frame Based on Four Regional Vertical Datums, StudiaGeophysica et Geodaetica, 48, (3), 493-502.*
- 16-Burša, M., Kenyon, S., Kouba, J., Šíma, Z., Vatrt, V., Vitek, V. and Vojtíšková, M. (2007) *The geopotential value W_0 for specifying the relativistic atomic time scale and a global vertical reference system, J. Geod., 81, (2), 103-110.*