

# توليد نموذج رقمي للارتفاعات من صور الأقمار الصناعية ( Sentinel-1) باستخدام تقنية التداخل الراداري - منطقة الدراسة: تلكلخ □ القرينتين في سورية

م. دارين جابر نوفل \* د.م حنان كامل درويش \*\* د.م عدنان أحمد محمد \*\*  
د.م فادي عز الدين شعبان \*\*\*

## المخلص

إن النماذج الرقمية للارتفاعات (DEMs) ذات أهمية كبيرة في العديد من المجالات العلمية والتطبيقية كونها تعدّ مدخلات رئيسية لمجموعة كبيرة ومتنوعة من التطبيقات، وهي أيضاً من أهم مصادر البيانات الخاصة بالمعلومات والتحليلات الجغرافية المكانية. يقدم هذا البحث دراسة مقارنة حول جودة وموثوقية الـ (DEM) المولد باستخدام تقنية التداخل الراداري من بيانات القمر الصناعي (Sentinel-1) عن طريق معالجة (11) زوجاً من الصور في منطقتي تلكلخ والقرينتين في مدينة حمص في سورية، ودراسة تأثير خط الأساس الزمني والعمودي واتجاه طيران القمر الصناعي المساعد والهابط على جودة مخططات التداخل والتماسك وبالتالي قيم الارتفاعات الناتجة. كما تم تقييم الدقة و إجراء مقارنة إحصائية لقيم الارتفاعات المشتقة مع قيم ارتفاعات مجموعة من النقاط المقاسة حقلياً في منطقتي الدراسة. إذ بينت النتائج أن أفضل قيمة لجذر الخطأ المتوسط التربيعي (RMSE) تساوي (8.04 م) في منطقة القرينتين ذات الطبيعة السهلية والغطاء النباتي المنخفض في حالة المدار الهابط من أجل خط أساس زمني (12) يوماً وخط أساس عمودي (151 م). أما في تلكلخ ذات التضاريس الوعرة والغطاء النباتي الكثيف فقد بلغت قيمة الـ (RMSE) المقدار (12.62 م) في حالة المدار الهابط من أجل خط أساس زمني (12) يوماً وخط أساس عمودي (143 م). بينت الدراسة أن نماذج الارتفاع الرقمية في القرينتين في حالة المدار المساعد أكثر دقة منها في تلكلخ، وذلك من أجل عدة خطوط أساس عمودية و زمنية متساوية للمنطقتين حيث

تراوحت قيم ال (RMSE) بين (10.67)، (14.01) و (68.77 م) في القريتين بينما  
ازدادت في منطقة تللكخ إلى القيم المقابلة ما بين (46.27)، (68.54) و (148.91 م).

الكلمات المفتاحية: النموذج الرقمي للارتفاعات (DEM)، التداخل الراداري، تقييم الدقة، خط  
أساس زمني، خط أساس عمودي، المدار الهابط، المدار الصاعد.

---

\* طالبة دراسات عليا في قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث -

حمص - سورية. [✉darennofl@gmail.com](mailto:darennofl@gmail.com)

\*\* أستاذ مساعد في قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة البعث - حمص -  
سورية.

[✉hanan.darwishe@hotmail.com](mailto:hanan.darwishe@hotmail.com), [✉ad.moh4@gmail.com](mailto:ad.moh4@gmail.com)

\*\*\* أستاذ مساعد في قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية -  
سورية. [✉fadi.chaaban@tishreen.edu.sy](mailto:fadi.chaaban@tishreen.edu.sy)

---

# Generating a Digital Elevation Model from Sentinel-1 satellite images using interferometry technique – Study Area: Tal Kalakh – Al-Qaryatayn in Syria

Eng. Dareen Nofl \*

Dr.Eng. Hanan DARWISHE\*\*

Dr.Eng. Adnan Mohammad\*\*

Dr.Eng Fadi CHAABAN\*\*\*

## Abstract

Digital Elevation Models (DEMs) are of great importance in many scientific and applied fields as they are the main inputs for a wide variety of applications, in addition, they are one of the most significant data sources for geospatial information and analysis.

This research presents a comparative study on the quality and reliability of (DEM) generated using the radar interferometry technique from Sentinel satellite data by processing (11) pairs of images in Tal Kalakh and Al-Qaryatayn regions in Homs city/ Syria. Moreover, the impact of temporal and perpendicular baseline and the direction of the satellite's ascending and descending flight was examined on the quality of interferogram and coherence products and thus the resulting elevation values. accuracy assessment and a statistical comparison were performed of the derived elevation values with the elevation values of a set of field-measured points in both study areas. where the results showed that the best value of the mean square error (RMSE) was (8.04 m) in the Al-Qaryatayn region, which has a plain nature and low vegetation cover in the case of a descending orbit for temporal baseline (12) days and perpendicular baseline (151 m). While in the Tal Kalakh region, which has rugged terrain and dense vegetation, the value of (RMSE) was (12.62 m) in the case of a descending orbit for temporal baseline (12) days and perpendicular baseline (143 m). Digital Elevation Models in Al-Qaryatayn in the case of the ascending orbit are more accurate than in Tal Kalakh for several unified temporal and perpendicular baselines of the two regions, where the (RMSE) values

ranged between (10.67), (14.01) and (68.77 m) in Al-Qaryatayn while they decreased in Tal Kalakh to the corresponding values between (46.27), (68.54 )and (148.91 m).

**Key words:** digital elevation model (DEM), Radar Interferometry, Accuracy Assessment, temporal baseline, perpendicular baseline, descending orbit, ascending orbit .

---

\* Postgraduate student, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

✉ [dareennofl@gmail.com](mailto:dareennofl@gmail.com)

\*\* Associate Professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

✉ [hanan.darwishe@hotmail.com](mailto:hanan.darwishe@hotmail.com) ✉ [ad.moh4@gmail.com](mailto:ad.moh4@gmail.com)

\*\*\* Associate Professor, Department of Topographic Engineering, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. ✉

[fadi.chaaban@tishreen.edu.sy](mailto:fadi.chaaban@tishreen.edu.sy)

---

## 1 مقدمة

تتوافر مجموعة من النماذج الرقمية للارتفاعات (DEMs) والمأخوذة باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد، التي يمكن تحميلها مجاناً من الإنترنت وتغطي كامل سطح الكرة الأرضية. إذ لا تزيد دقتها المساحية المكانية عن (30م) مثل نماذج (ASTER GDEM) و (SRTM1sec) وبالتالي لا يمكن تطبيقها في الدراسات الحساسة. إن النماذج الرقمية للارتفاعات المستتبطة من القياسات الأرضية (مساحة أرضية أو تصويرية) هي دقيقة ولكن لجزء صغير من الأرض ومكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً في الإنشاء.

يعتبر قياس التداخل بالرادار ذي الفتحة التركيبية (InSAR) من الطرق الحديثة لتوليد الـ (DEM). يوفر كوبرنيكوس، البرنامج الأوروبي لرصد البيئة، مجموعات بيانات رادارية مستمرة من خلال مهمة القمر (Sentinel-1) مع تغطية عالمية تقريباً. إن القمر (Sentinel-1) الذي تم إطلاقه في عام (2014) هو جزء التصوير بالرادار من مهمة (Sentinel). وهو عبارة عن سلسلة من عمليات رصد الرادار عبر الأقمار الصناعية كمشروع مشترك بين الاتحاد الأوروبي ووكالة الفضاء الأوروبية (ESA). يحمل (Sentinel-1) جهاز استشعار (SAR) بتردد مركزي يبلغ ( 5.405 جيجا هرتز) يغطي النطاق (C) من الطيف الكهرومغناطيسي [1]. تتكون هذه المهمة حالياً من Sentinel-1A (S1A) و Sentinel-1B (S1B) حيث، تزودنا بمنتجات على فترات تصل إلى (6) أيام بدقة مكانية تبلغ (20م × 5 م)، والتي يمكن الوصول إليها مجاناً ضمن برنامج كوبرنيكوس، إذ تم إثبات إمكاناتها في جميع مجالات التطبيقات.

إن الخطوة الحاسمة لتوليد (DEM) ناجح باستخدام تقنية (InSAR) هي اختيار زوج من الصور بخصائص مناسبة [2]. تهدف معظم الدراسات في هذا المجال إلى تقدير التضاريس المحلية أو الإقليمية بناءً على زوج من منتجات (Sentinel-1). مثال ذلك الدراسة التي تمت في منطقة تونك في الهند [3]، حيث كان الفرق الزمني بين الصور (12) يوماً وتم التحقق من صحة وجودة الـ (DEM) الناتج بصرياً اعتماداً على طبقة التماسك، والتي كانت منخفضة بالنسبة للأراضي الزراعية والمسطحات المائية. إذ اقترح المؤلفون معالجة هذه المشكلة بتخفيض خط الأساس الزمني إلى (6) أيام من خلال الجمع بين صور (S1A) و (S1B). في [4] تم توصيف ومناقشة سلسلة المعالجة لاشتقاق الـ (DEM) من الصور ذات

المدار الصاعد والهابط للقمر الصناعي (ERS) من أجل تقليل الأخطاء الناتجة عن هندسة الإضاءة. وتم تحليل ستة صور تداخل من أزواج صور (Sentinel-1) لمدينة تسوكوبا في اليابان في [5]، إذ أكدت دراستهم أنه كلما كان ارتفاع الغموض (Height Ambiguity) أكبر، كلما كانت دقة الـ (DEM) أقل. تم اختبار قدرات قياس التداخل لتقديرات ارتفاع المبنى في لاريسا، اليونان من خلال استخدام ستة أزواج من الصور بخطوط أساس زمنية تتراوح بين (6) و (28) يوماً وخطوط أساس عمودية بين (114-171 م) لإنشاء نموذج رقمي للسطوح (DSM) فردي، والذي تم تكديسه ووضع متوسط له لتشكيل (DSM) حضري نهائي و استنتج المؤلفون أن الدقة المكانية لـ (Sentinel-1) ليست كافية للتنبؤ بشكل موثوق بارتفاع المبنى الفردي ولكن النتائج يمكن أن تكون مفيدة على مستوى الكتلة [6]. تم استخدام أربعة أزواج من صور (Sentinel-1) من سنوات مختلفة لكل منها، مع خطوط أساس زمنية تتراوح بين (6 و 24) يوماً وخطوط أساسية عمودية بين (24 و 180 م) وذلك في دراسة ارتفاعات الأنهار الجليدية على عكس ارتفاعات التضاريس لنهرين جليديين في منتزه ( Los Glaciares) الوطني في الأرجنتين، مع وجود اختلافات في الارتفاعات تزيد عن (2000 م [7]). إذ استنتجت هذه الدراسة أن هناك تدهور شديد في جودة الطور بسبب تأثير الغطاء النباتي والمنحدرات الحادة والكتل الجليدية المتحركة، وأن الأزواج ذات خطوط الأساس العمودية التي تقل عن (70 م) لم تكن قابلة للاستخدام في هذه الحالة.

## 2 هدف البحث وأهميته

تهدف هذه الدراسة إلى الاستفادة من مجموعات بيانات الـ (Sentinel-1) واستغلال برمجيات معالجة بيانات الرادار مفتوحة المصدر (SNAP) (Sentinel Applications Platform) وهي منصة تطبيقات لمعالجة صور (Sentinel)، بالإضافة لاستخدام أدوات (SNAPHU) خوارزمية تدفق تكلفة الشبكة الإحصائية لفك الطور (Network-Flow Phase Unwrapping) المقدمة على التوالي بواسطة وكالة الفضاء الأوروبية (ESA) وجامعة ستانفورد. وذلك، بهدف توليد نموذج (DEM) لمنطقة الدراسة في تللكخ والقريتين، والعمل على إيجاد أفضل دقة للـ (DEM) من خلال مقارنة بعض البارامترات وخصائص الصور المستخدمة (خطوط أساس مكانية عمودية وزمنية مختلفة، مدار صاعد

وهابط). تكمن أهمية هذا البحث في وضع منهجية معالجة توفر الوقت والجهد اللازم لتوليد نموذج (DEM) بشكل مجاني وتغطية مكانية كبيرة. بالإضافة إلى إمكانية توليد نموذج (DEM) قبل وبعد هزة أرضية أو انهيار أرضي أو حدث معين، مما يسمح لنا بدراسة التغيرات التي طرأت على السطح الأرضي نتيجة لتوفر البيانات الرادارية المستمرة منذ عام (2014) والتي يزودنا بها موقع كوبيرنيكوس.

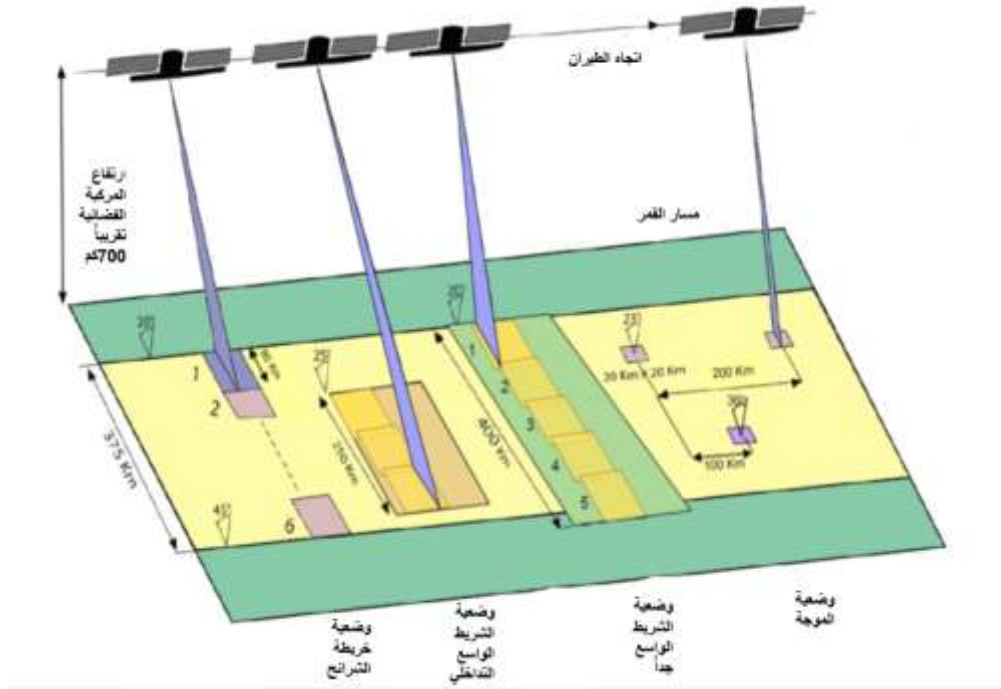
### 3 مواد وطرائق البحث

#### 3.1 صور (Sentinel-1)

يمكن لـ (Sentinel-1) الحصول على صور (SAR) بأنواع مختلفة من الاستقطابات مثل ( HH و HV و VV و VH) [8]. يمكن تشغيل (Sentinel-1) بأحد أوضاع الاستحواذ الأربعة للحصول على صور (SAR) (الشكل 1) [9]:

- 1- وضعية خريطة الشرائح (Stripmap Mode (SM)
- 2- وضعية الشريط (الرقعة) الواسع التداخلي Interferometric Wide Swath Mode (IW)
- 3- وضعية الشريط الواسع جدا (Extra Wide Swath Mode (EW)
- 4- وضعية الموجة (Wave Mode (WV)

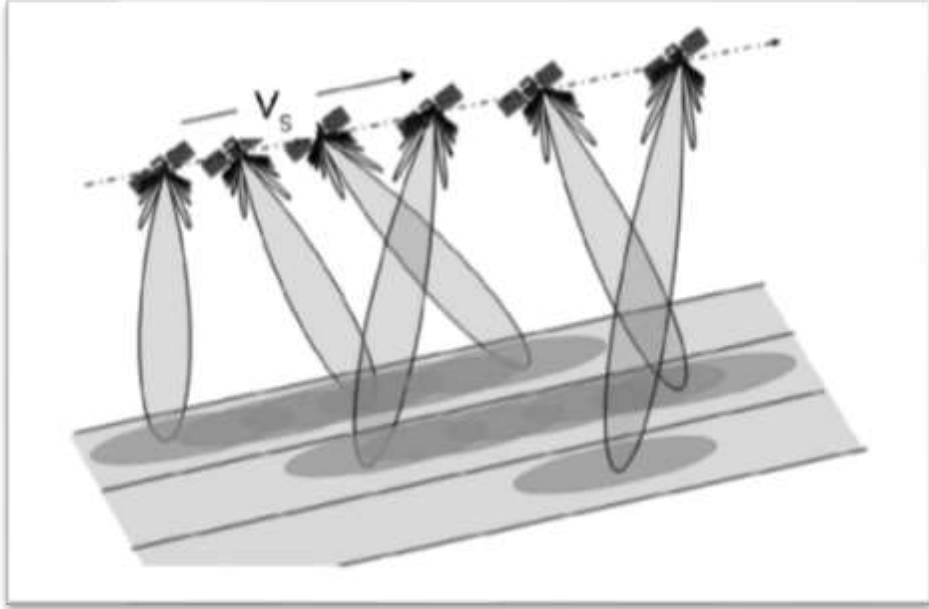
توليد نموذج رقمي للارتفاعات من صور الأقمار الصناعية (Sentinel-1) باستخدام تقنية التداخل الراداري - منطقة الدراسة: تلخخ - القريتين في سورية



الشكل 1 : أوضاع تصوير Sentinel-1

إن وضع (IW) هو وضع التصوير الرئيسي لـ ( Sentinel-1 ) لأغراض قياس التداخل. يعمل كل من وضعي (IW) و (EW) في وضع رصد التضاريس بالمسح التدريجي في السمات (TOPS) Terrain Observation with Progressive Scans in (Azimuth) (الشكل 2) [10]. مما يوفر عرضاً كبيراً للرقعة يبلغ (250 كم) بدقة مكانية تبلغ ( 20 م × 5 م ) و (400 كم) بدقة مكانية تبلغ (40 م × 20 م)، على التوالي. في وضع التصوير (TOPS SAR)، يتم توجيه حزمة سمات الهوائي من الخلف إلى المقدمة بمعدل ثابت. ونتيجة لذلك، وعلى عكس Scan SAR، يتم رصد جميع الأهداف على الأرض من خلال مخطط هوائي سمّي كامل الذي يلغي تقريباً تأثير التقوقع (Scalloping) ويحقق غموضاً ثابتاً في السمات ونسبة الإشارة إلى الضجيج (SNR) شبه موحدة على طول السمات. ومع ذلك، فإن توجيه حزمة السمات السريع يقلل من زمن بقاء الهدف، وبالتالي يقلل دقة التمييز المكانية باتجاه السمات [9].





الشكل 2 : نمط تصوير ( TOPS SAR )

### 3.2 تداخل الـ (SAR)

يرتبط كل بكسل من صورة الـ (SAR) الرقمية بمساحة من سطح الأرض تدعى دقة الخلية ( Resolution Cell). ولكل بكسل رقم معقد يحتوي معلومات السعة (Amplitude) والطور (Phase) للمجال الميكرويفي المنعكس من جميع المبعثرات (Scatterers) مثل الصخور و الغطاء النباتي و الأبنية ضمن دقة الخلية المسقطة على الأرض.

ترتبط الصفوف المختلفة للصورة مع مواقع سمتية مختلفة في حين تشير الأعمدة المختلفة إلى مواقع نطاقات مائلة مختلفة. يعتمد موقع وأبعاد دقة الخلية في إحداثيات السمات والمدى المائل فقط على خصائص النظام . وتحتوي صورة ( SAR ) المكتشفة على قياس السعة لإشعاع الرادار المرتد عن المبعثرات الموجودة في كل دقة خلية. تعتمد هذه السعة على الخشونة أكثر من التركيب الكيميائي. وتعرض بواسطة مستويات التدرج الرمادي. حيث تقابل البكسلات اللامعة مساحات ذات إشعاع متبعثر قوي (مثل المناطق العمرانية) في حين تقابل البكسلات الداكنة إشعاع متبعثر منخفض (حوض الماء الساكن) [11]. يدمج الـ ( InSAR )

بأبسط أشكاله صورتي ( SAR ) تمت محاذاتهما بدقة لنفس المشهد لتكوين صورة لفرق الطور تسمى مخطط التداخل (Interferogram) عن طريق حساب الاختلافات في الطور لأموال الرادار ويتم عرض التداخل الناتج بالألوان. يمكن الحصول على صورتي ( SAR ) لتشكيل التداخل إما من هوائيين على نفس المنصة الفضائية ويفصلان بشكل عمودي على اتجاه الطيران (اتجاه السمات)، وهي تقنية تسمى التداخل أحادي المسار ( Single Pass Interferometry ) (وتسمى أيضاً التداخل المتزامن) أو من تمريرات مختلفة لنفس هوائي ( SAR ) في أوقات مختلفة، والمعروفة باسم ( Repeat-Pass Interferometry ) وهي التقنية المستخدمة في دراستنا. تسمى دورات فرق الطور في التداخل بالهامش (Fringes) وتنتج عن التفاف الطور لأن كسر الموجة المرصودة لا يزيد عن دورة موجية واحدة. اعتماداً على اتجاه الرؤية للقمر، يقابل كل هامش زيادة أو نقصان في مدى نصف طول موجة الـ ( SAR ) على طول خط النظر للقمر.

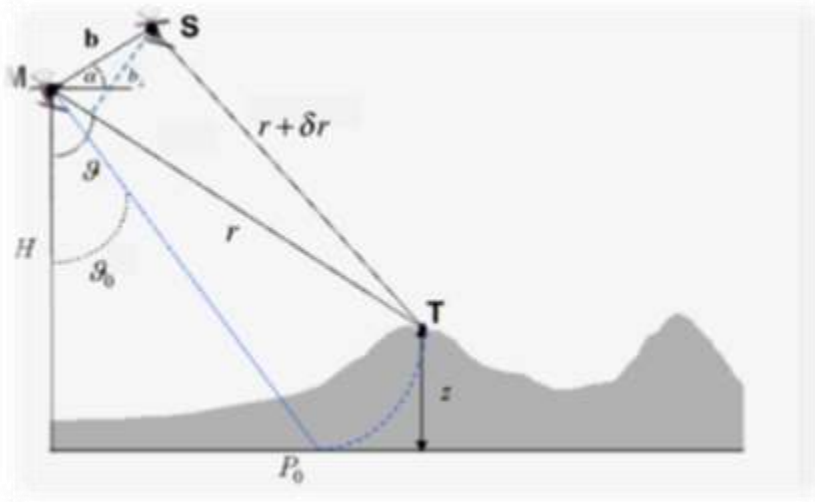
يعتمد طور قياس التداخل لكل بكسل فقط على الاختلاف في مسارات انتقال الإشارة من كل من مستشعري ( SAR ) إلى دقة الخلية المدروسة. وفقاً لذلك، يحتوي مخطط التداخل المحسوب على تباين في الطور (  $\phi$  ) من عدة عوامل مساهمة:

- عامل انحناء الأرض (طور الأرض المسطحة  $\phi_{flat}$ )
- عامل السطح الطبوغرافي للأرض (الطور الطبوغرافي  $\phi_{DEM}$ )
- عامل الظروف الجوية (تغير الرطوبة ودرجة الحرارة و الضغط بين عمليات الاستحواذ  $\phi_{atm}$ )
- عامل مصادر الضوضاء الأخرى (تغيير المشتتات أو المبعثرات، زاوية نظر مختلفة، تشتت حجمي  $\phi_{noise}$ )
- عامل تشوه (انزياح) السطح الذي حدث بين عمليتي الاستحواذ (طور الإزاحة  $\phi_{disp}$ ) [2].

### 3.3 تقنية الـ ( InSAR ) لتقدير تضاريس الارتفاع

عندما يلتقط نظام الرادار صورتي ( SAR ) لنفس المنطقة، تدعى الصورة الأولى الصورة الرئيسية ( Master ) ويتم التقاطها من الموقع المداري (M)، ويتم التقاط الصورة الثانية (أو

ما يسمى بالصورة التابعة (Slave) من الموقع المداري (S) و الموجود على مسافة (b) (يشار إليها باسم خط الأساس Baseline) من (M). في المستوى المتعامد مع اتجاه السمت يتم فصل هوائيي (SAR) بواسطة متجه خط الأساس (b). من (الشكل 3) الذي يوضح تشكيل تداخل (SAR) يمكن كتابة العلاقة (1) التي توضح المكون العمودي  $b_{\perp}$  لخط الأساس (خط الأساس العمودي) [12]:



الشكل 3 : تشكيل تداخل (SAR)

$$b_{\perp} = b \cos(\vartheta - \alpha) \quad (1)$$

حيث (  $\theta$  ) و (  $\alpha$  ) هما زاوية الرؤية الجانبية للقمر الصناعي وزاوية ميل متجه خط الأساس بالنسبة للمستوى الأفقي، على التوالي.

يمكن تمثيل صور (SAR) الرئيسية والتابعة (  $\hat{\gamma}_2, \hat{\gamma}_1$  ) رياضياً بكسلاً تلو الآخر، على النحو التالي في المعادلات 2 و3:

$$\hat{\gamma}_1 = \gamma_1 \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} r \right] \quad (2)$$

$$\hat{\gamma}_2 = \gamma_2 \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} (r + \delta r) \right] \quad (3)$$

حيث:  $j = \sqrt{-1}$  ،  $r$  هي المدى أو النطاق (range) بين الموقع المداري M ونقطة الكائن المدروسة.

$\delta r$  الفرق بين النطاقين من موقعي القمر M و S إلى النقطة المدروسة  
 $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  هما توابع الانعكاس المعقدة لبيانات الصورة الرئيسية والتابعة، على التوالي وتشير  
 $\lambda$  إلى الطول الموجي الفعال للرادار.

للتبسيط، في المعادلات (2 و 3) لم يتم اعتبار وجود إشارات ضجيج ممكنة. من أجل كل  
بكسل، يمكن الحصول على فرق الطور بين صورتني (SAR) عن طريق ضرب الصورة  
الرئيسية في المرافق المعقد للصورة التابعة ( $\hat{\gamma}_2^*$ ) كما في المعادلة (4) [12]:

$$C = \hat{\gamma}_1 \hat{\gamma}_2^* = |\hat{\gamma}_1 \hat{\gamma}_2| \exp \left[ j \left( \frac{4\pi}{\lambda} \delta r + \angle \gamma_1 - \angle \gamma_2 \right) \right] \quad (4)$$

يشير الرمز ( $*$ ) إلى عملية المرافق المعقد و يمثل الرمز ( $\angle$ ) عملية استخراج الطور.  
من المعادلة (4)، بافتراض أن آلية التبثر لم تتغير بين مروري المستشعر على المنطقة  
المدروسة نحصل على:

$$C = \hat{\gamma}_1 \hat{\gamma}_2^* = |\hat{\gamma}|^2 \exp \left[ j \frac{4\pi}{\lambda} \delta r \right] \quad (5)$$

وهكذا، نحصل على طور التداخل ( $\varphi$ ) ما في المعادلة (6):

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r \quad (6)$$

بتطبيق قاعدة جيب التمام على المثلث (MST) الموضح في (الشكل 3) [13]، يمكن  
إثبات أن:

$$r + \delta r = \sqrt{b^2 + r^2 - 2br \sin(\vartheta - \alpha)} \simeq r' - b \sin(\vartheta - \alpha) \quad (7)$$

حيث ( $\vartheta$ ) تمثل

زاوية الرؤية الجانبية

وبالتالي، يمكن كتابة طور التداخل وفق المعادلة (8):

$$\varphi \simeq -\frac{4\pi}{\lambda} b \sin(\vartheta - \alpha) \quad (8)$$

عندما تكون الأرض مسطحة (أي  $Z=0$ ) فإن،  $\vartheta = \vartheta_0$  التي تمثل زاوية الرؤية الجانبية في حالة الأرض المنبسطة، وتصبح المعادلة (8) على الشكل:

$$\varphi \simeq -\frac{4\pi}{\lambda} b [\sin(\vartheta_0 - \alpha) + \cos(\vartheta_0 - \alpha)(\vartheta - \vartheta_0)] \quad (9)$$

يرتبط ارتفاع الهدف، أي  $Z$ ، بزاوية الرؤية الجانبية  $\vartheta$  وارتفاع القمر الصناعي  $H$

كما في العلاقة (10):

$$Z = H - r \cos \vartheta \quad (10)$$

$$\frac{\partial z}{\partial \vartheta} = r \sin \vartheta \rightarrow \frac{\partial \vartheta}{\partial z} = \frac{1}{r \sin \vartheta} \rightarrow$$

$$\vartheta - \vartheta_0 = \frac{z}{r \sin \vartheta} \quad (11)$$

$$\varphi \simeq -\frac{4\pi}{\lambda} b \sin(\vartheta_0 - \alpha) - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_{\perp}}{r \sin \vartheta} z \quad (12)$$

يمثل الحد الأول على الجانب الأيمن من المعادلة (12) ما يسمى بمساهمة طور الأرض المسطحة أو الطور المرجعي، أي الطور الذي يتم الحصول عليه عندما يكون السطح الطبوغرافي مسطحاً تماماً ( $Z = 0$ ).

يربط الحد الثاني طور قياس التداخل بارتفاع السطح  $Z$ . من خلال المعادلة (12)، يتضح أن طور قياس التداخل يتناسب مع الارتفاع من خلال قيمة خط الأساس العمودي لزوج بيانات قياس التداخل. وفقاً لذلك، كلما زاد خط الأساس العمودي، زادت دقة تقدير التضاريس، كما هو موضح في المعادلة التالية (13) التي تربط الانحراف المعياري لقياس الطور  $\sigma_{\varphi}$  (أي خطأ قياس طور (InSAR) بالانحراف المعياري لقياسات الارتفاع المشتقة من (InSAR):

$$\sigma_z = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{r \sin \vartheta}{b_{\perp}} \sigma_{\varphi} \quad (13)$$

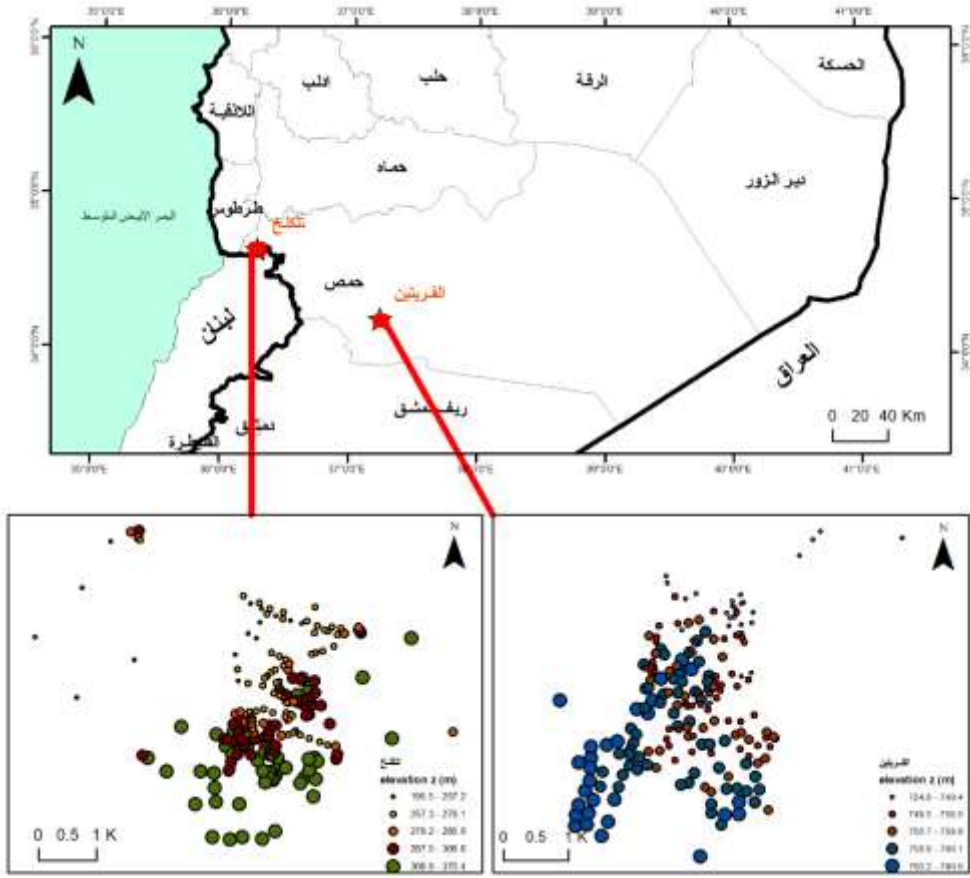
هناك مقياس آخر يستخدم بشكل متكرر لأداء قياس التداخل لتقدير تضاريس الارتفاع و هو ما يسمى بارتفاع الغموض (Height Ambiguity)، والذي يمثل مقدار تغير الارتفاع الذي يؤدي إلى تغيير قدره ( $2\pi$ ) في طور قياس التداخل، والذي يمكن اشتقاقه بسهولة من المعادلة (13)، بفرض ( $\sigma_{\varphi} = 2\pi$ ) على النحو التالي:

$$z_{2\pi} = \left| -\frac{\lambda r \sin \vartheta}{2b_{\perp}} \right| \quad (14)$$

#### 3.4 منطقة الدراسة والبيانات المستخدمة في البحث

تم اختيار منطقتين للدراسة، منطقة القريتين و منطقة تلكلخ الشكل(4)، وذلك بهدف دراسة تأثير البارامترات المختلفة على دقة الارتفاعات الناتجة باستخدام تقنية (InSAR). تقع تلكلخ على مسافة (45 كم) إلى الغرب من مدينة حمص، وهي ذات طبيعة تضاريسية وعرة وترتفع عن سطح البحر حوالي (500 م). تقع القريتين على تخوم البادية السورية وإلى الجنوب الشرقي من مركز محافظة حمص بحوالي (85 كم) وتتميز بتضاريس سهلية وغطاء نباتي خفيف.

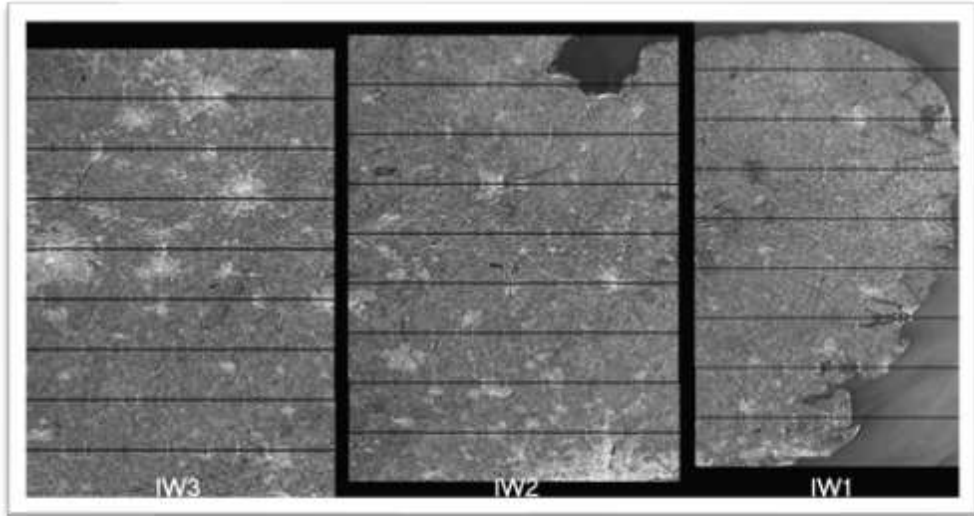
يوضح الشكل (4) توزيع النقاط الحقلية التي تم قياسها باستخدام أعمال المسح الأرضي واستخدامها لتقييم الدقة في منطقتي الدراسة.



الشكل 4: منطقة الدراسة وتوزع نقاط القياسات الحقلية في منطقتي الدراسة (تلخالخ - القريتين)

تم استخدام منتجات مركب مشهد مفرد (single look complex) IW-SLC التي تتكون من ثلاث رقع فرعية لكل قناة استقطاب فرعية (IW1, IW2, IW3). إذ تعتمد تسمية كل رقعة فرعية على نوع المدار، أي صاعد (Ascending) حيث يدور القمر من الجنوب إلى الشمال ويرصد من جهة الغرب أو هابط (Descending) يدور القمر من الشمال إلى الجنوب ويرصد من جهة الشرق، الرقعة الفرعية القريبة إلى المدى القريب هي (IW1)، والرقعة الفرعية في المدى البعيد هي (IW3) وتتكون كل رقعة فرعية من تسع رشقات (bursts)، حيث تتم معالجة كل رشقة كصورة (SLC) منفصلة. يتم تضمين الرشقات المتسلسلة المعقدة المركزة الفردية بترتيب زمن السمات في صورة رقعة فرعية، مع ترسيم الحدود باللون الأسود. كما في (الشكل 5):

تم تحميل البيانات المستخدمة في هذا البحث من مركز الوصول المفتوح كوبرنيكوس، إذ تمت دراسة ستة أزواج من الصور في حالة المدار الصاعد (Ascending) في منطقتي تلخخ والقريتين بخطوط أساس زمنية تتراوح بين (6) و(36) يوماً وخطوط أساس عمودية تتراوح بين (82م) و(176م)، حيث احتوت كل صورة على منطقتي الدراسة معاً في رقتين فرعيتين مختلفتين ولذلك كانت خطوط الأساس العمودية والزمنية نفسها في المنطقتين في حالة المدار الصاعد. كذلك تمت دراسة خمسة أزواج من الصور في حالة المدار الهابط (Descending) في المنطقتين بخطوط أساس زمنية تتراوح بين (12) و(96) يوماً وخطوط أساس عمودية تتراوح بين (143م) و(177م). لم تتضمن الصورة الواحدة في حالة المدار الهابط على منطقتي الدراسة معاً لذلك، كانت فقط خطوط الأساس الزمنية نفسها في المنطقتين بينما اختلفت خطوط الأساس العمودية بسبب اختلاف موقع القمر أثناء عملية التصوير لمنطقتي الدراسة في حالة المدار الهابط كما هو موضح في الجدول (1).



الشكل 5: الرقع الفرعية لصورة (IW-SLC) في حالة المدار الهابط



الجدول(1): أزواج الصور المستخدمة مع خطوط الأساس الزمنية والعمودية

أزواج الصور من المدارات الصاعدة ( ascending )					
	الصورة التابعة Slave	الصورة الرئيسية Master	b <sub>temp</sub> day خط الأساس الزمني	b <sub>⊥</sub> m خط الأساس العمودي	منطقة الدراسة
1	S1B_IW_SLC__1SDV_20190904	S1B_IW_SLC__1SDV_20191010	36	119	القرينتين
2	S1B_IW_SLC__1SDV_20190928	S1B_IW_SLC__1SDV_20191010	12	82	القرينتين
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20191004	S1B_IW_SLC__1SDV_20191010	6	176	القرينتين
4	S1B_IW_SLC__1SDV_20190904	S1B_IW_SLC__1SDV_20191010	36	119	تلكلخ
5	S1B_IW_SLC__1SDV_20190928	S1B_IW_SLC__1SDV_20191010	12	82	تلكلخ
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20191004	S1B_IW_SLC__1SDV_20191010	6	176	تلكلخ
أزواج الصور من المدارات الهابطة ( descending )					
1	S1B_IW_SLC__1SDV_20190625	S1B_IW_SLC__1SDV_20190929	96	172	تلكلخ
2	S1B_IW_SLC__1SDV_20200731	S1B_IW_SLC__1SDV_20190929	60	153	تلكلخ
3	S1B_IW_SLC__1SDV_20191011	S1B_IW_SLC__1SDV_20190929	12	143	تلكلخ
4	S1B_IW_SLC__1SDV_20191011	S1B_IW_SLC__1SDV_20190929	12	151	القرينتين
5	S1B_IW_SLC__1SDV_20190625	S1B_IW_SLC__1SDV_20190929	96	177	القرينتين

### 3.5 معالجة البيانات

#### 3.5.1 التسجيل المشترك ( Coregistration )

مخطط التداخل هو نتيجة قياس التداخل من صور ( SAR ) مركبة ( complex ) حصل عليها الرادار لنفس المنطقة ولكن في مواضع مختلفة للرادار، بحيث تختلف صورة الهدف نفسه في الصورتين. هذا يعني أن هناك إزاحة بين الصورتين تتعلق بهندسة الـ ( SAR ) ومدار القمر الصناعي وتوقيت الرادار وطبوغرافيا الهدف. ومن أجل إنشاء مخطط تداخل صحيح، يجب تسجيل الصورة التابعة في نفس هندسة الصورة الرئيسية بحيث يكون لكل هدف في الصورتين

إحداثيات متطابقة (نفس النطاق) (Range) وموضع السمات (Azimuth) بالضبط [14].  
من أجل إعادة تشكيل الصورة التابعة إلى هندسة الصورة الرئيسية، يلزم تعيين متعدد الحدود  
من الدرجة المنخفضة (d) كما في المعادلة (15) [15]:

$$\begin{pmatrix} \xi_S \\ \eta_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_M \\ \eta_M \end{pmatrix} + \sum_{i=0}^d \sum_{j=0}^{d-i} \begin{pmatrix} a_{ij} & \xi_M^i & \eta_M^j \\ b_{ij} & \xi_M^i & \eta_M^j \end{pmatrix} \quad (15)$$

يتم إجراء تقدير أولي خشن (coarse) لمعاملات كثير الحدود  $(a_{00}, b_{00})$ ، نحصل عليها  
من هندسة المدار مفترضين ارتفاع صفري للتضاريس. يتم إجراء ترميز جغرافي (Geocoding)  
للبيكسل ذي الإحداثيات  $(\xi_M, \eta_M)$  في الصورة الرئيسية [16]، ويتم حساب  
إحداثيات البيكسل المقابل في الصورة التابعة  $(\xi_S, \eta_S)$  عن طريق الترميز الجغرافي  
العكسي (Backgeocoding). وهكذا نحصل على إزاحات التسجيل المشترك المدارية  
 $(\Delta\check{\xi}, \Delta\check{\eta})$  كما في (المعادلة 16):

$$\Delta\check{\xi} = \check{\xi}_S - \xi_M \quad (16)$$

$$\Delta\check{\eta} = \check{\eta}_S - \eta_M$$

والتي تُستخدم لاحقاً لتحديد الإزاحة النسبية لأزواج البقع الموزعة بشكل متجانس من صورتي  
السعة. يؤدي الارتباط المتبادل (Cross-Correlating) بين هذه الرقع إلى إزاحات  
تسجيل أكثر دقة من الارتباط (Correlation) (المعادلة 17):

$$\Delta\xi = \xi_S - \xi_M$$

$$\Delta\eta = \eta_S - \eta_M \quad (17)$$

يتيح الإفراط في أخذ العينات تحديد الإزاحات على مستوى البيكسل الفرعي باستخدام الأداة (TOPSAR-Split)، يتم اختيار الرقعة الفرعية (Subswath) والرشقات (Bursts) المناسبة لتحديد منطقة الدراسة واختزال كمية المعالجة (الشكل 6).

يتم تحميل البيانات المتعلقة بموقع القمر الصناعي أثناء استحواد بيانات (SAR) تلقائياً  
لمنتجات (Sentinel-1) بواسطة برنامج (SNAP) وإضافتها إلى بيانات التعريف الخاصة  
بها مع مشغل تطبيق ملف المدار (APPLY ORBIT FILE). تم اختيار (SRTM 1sec)  
(DEM) و طريقة الجار الأقرب (nearest-neighbor) لإجراء الترميز  
الجغرافي العكسي.



الشكل 6: الرقعة الفرعية IW2 والرشقات 8 و9 في منطقة تملكخ في حالة المدار الهابط

### 3.5.2 تشكيل مخطط التداخل (Interferogram)

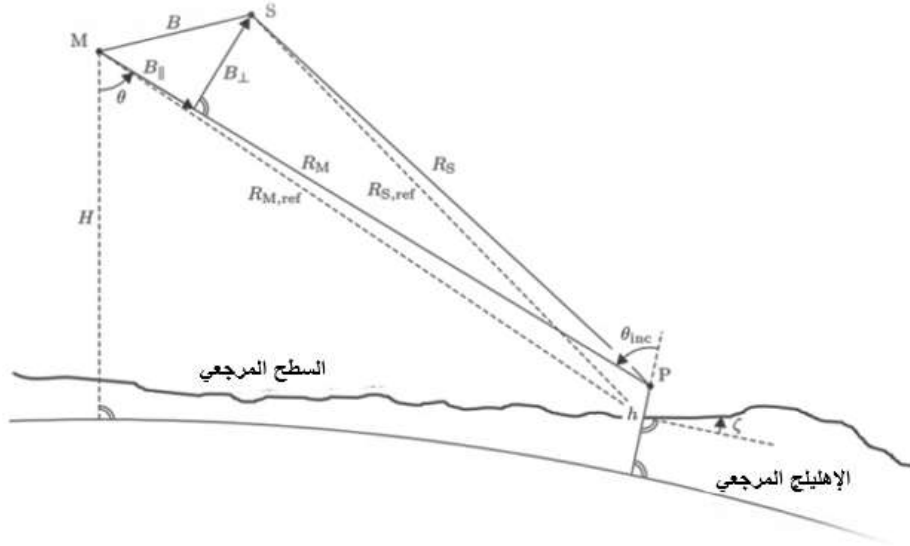
من الأفضل الإبقاء على مساهمات الغلاف الجوي والضوضاء الأخرى صغيرة قدر الإمكان لأنه من الصعب تقديرها. وأن لا تكون هناك إزاحة في السطح بين زمني استحواذ الصورتين. لذلك قمنا باستخدام صور من موسم الجفاف بخط أساس عمودي مناسب عن طريق بوابة البحث (<https://search.asf.alaska.edu>) باستخدام أداة خط الأساس (baseline tool) التي توفر تصوراً لبيانات خط الأساس الزمني والعمودي. لتشكيل التداخل يتم طرح الطور الناتج عن انحناء سطح الأرض (الطور المرجعي  $(\phi_{ref})$ ) المعطى بالعلاقة التالية [15]:

$$\phi_{ref} = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_{M,ref} - R_{S,ref}) \quad (18)$$

حيث،  $(R_{M,ref})$  و  $(R_{S,ref})$  هي النطاقات إلى السطح المرجعي للصورة الرئيسية والتابعة على التوالي للهدف (P) المرمز جغرافياً كما يوضح (الشكل 7). يمكن تلخيص إجراء حساب الطور المرجعي في أربع خطوات [16]:

1- في عدة مواقع (أزمنة) على طول المدار (1)، يتم تحديد النطاقات إلى بضع نقاط موزعة بالتساوي في منطقة مخطط التداخل. إذ يتم استخدام تردد دوبلر المستخدم

- لتركيز ( SAR ) ، وزمن المدى، وتحديد الجسم المرجعي للعثور على موقع النقطة ( P ) عن طريق الحل التكراري لمجموعة من ثلاث معادلات [17].
- 2- بالنسبة لهذه النقاط، يتم استرداد الموضع في زمن التصوير على طول المدار ( 2 ) مع النطاقات المقابلة.
- 3- يتم تحديد فروق النطاق لكل نقطة مرجعية، وتحويلها إلى اختلافات طور.
- 4- استيفاء لكل دقة خلية ( Resolution Cell ) في مخطط التداخل.
- باستخدام معلومات البيانات الوصفية المدارية يتم تقدير طور الأرض المسطحة في البرنامج وطرحه من التداخل. إلى جانب طور قياس التداخل، يتم تقدير التماسك ( Coherence ) بين الصورة الرئيسية والصورة التابعة كمؤشر لجودة معلومات الطور. إذ يوضح ما إذا كانت الصور بها أوجه تشابه قوية وبالتالي فهي قابلة للاستخدام في معالجة قياس التداخل. قد يكون فقدان التماسك ناتج عن الفاصل الزمني بين استحواذ الصور (فوق الغطاء النباتي والأجسام المائية)، و هندسة المدار (أخطاء أو عدم دقة في البيانات الوصفية للمدار) أو عدم الترابط الحجمي ( Volume Decorrelation ) (آليات التششت المحتملة للهياكل الضخمة، مثل الغطاء النباتي المعقد أو الأسطح الجافة).



الشكل 7 : هندسة استحواذ ( InSAR ) والنطاقات إلى السطح المرجعي

يتم تقدير التماسك من خلال حساب قائم على النافذة لحجم معامل الارتباط المتبادل المعقد لصور ( SAR ) كما في المعادلة التالية [18]:

$$\gamma = \frac{\sum_{n=1}^N V_1^{(n)} \cdot V_2^{*(n)}}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |V_1^{(n)}|^2 \cdot \sum_{n=1}^N |V_2^{(n)}|^2}} \quad (19)$$

حيث ( N ) هو عدد البكسلات في النافذة، ( V ) هي إشارة الصورة (سعة وطور) وتشير ( V\* ) إلى المترافق المعقد للإشارة. تتراوح قيم التماسك بين ( 0 و 1 )، ستظهر مناطق التماسك العالي لامعة مثل مناطق المباني، والمناطق ذات التماسك المنخفض ستكون مظلمة

مثل مناطق الغطاء النباتي. إذا كانت مناطق التماسك المنخفض هي السائدة للغاية في الصورة، فسوف يفشل فك التغليف اللاحق وينتج عنه نتائج خاطئة أو عشوائية. تم حساب نطاق التماسك في البرنامج على أساس نافذة من (10x3) بيكسل في اتجاه المدى/السمت. تتم إزالة خطوط التماس في مخطط التداخل حيث يتم استخدام أداة ( TOPS Deburst) للقيام بهذه العملية.

لا يمكن استعادة معلومات الطور في مناطق التماسك المنخفض، ولكن يمكن زيادة جودة الهوامش الموجودة في مخطط التداخل من خلال تطبيق مرشحات طور متخصصة، مثل مرشح غولد شتاين ( Goldstein ) (المعادلة 20) الذي يستخدم تحويل فورييه السريع (FFT) لتحسين نسبة الإشارة إلى الضجيج في الصورة [19]. إذ تتم تجزئة التداخل إلى بقع مستطيلة متداخلة ويتم تقدير طيف الطاقة ( Power Spectrum ) (المعادلة 21) عن طريق تنعيم كثافة الـ ( FFT ) ثنائية الأبعاد. تتكيف دقة التمييز المكانية ( Spatial Resolution ) للمرشح مع تغير الطور المحلي، فيتم ترشيح مناطق الطور السلس بقوة بعكس المناطق ذات التباين العالي في الطور، والتي يتم الترشيح فيها بشكل ضعيف.

$$H(u, v) = |Z(u, v)|^a \quad (20)$$

$$Z(u, v) = \exp \left\{ -\frac{\frac{u^2}{\sigma_u^2} - \frac{2uv}{\sigma_u \sigma_v} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}}{2(1 - \rho^2)} \right\} \quad (21)$$

حيث،  $H(u, v)$ : مرشح تكيفي ( Adaptive Filter )

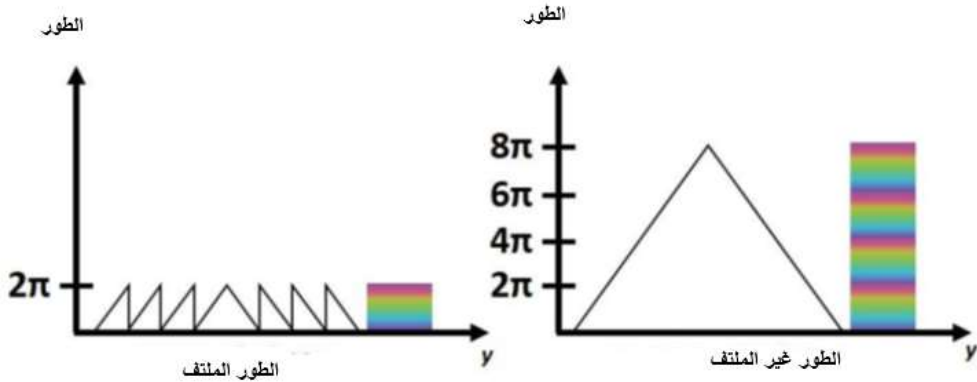
$Z(u, v)$ : طيف الطاقة ( Power Spectrum )

$(u, v)$ : إحداثيات التردد و  $(\sigma_u)$ ،  $(\sigma_v)$ : هي عرض النطاق للإحداثيات  $(u, v)$  على التوالي. نستخدم أداة فلتر غولدشتاين لزيادة جودة مخطط التداخل وهذا ما يساعدنا لاحقاً بشكل كبير في عمليات المعالجة.

### 3.5.3 فك تغليف (التفاف) الطور (PU) Phase Unwrapping

في مخطط التداخل، يكون طور قياس التداخل غامضاً ومعروفاً فقط ضمن مقياس  $(2\pi)$  لربط طور قياس التداخل بالارتفاع الطبوغرافي، يجب أولاً فك الطور. يُعرّف ارتفاع الغموض على أنه اختلاف الارتفاع الذي يولد تغييراً في طور قياس التداخل بمقدار  $(2\pi)$  درجة بعد

تسطيح مخطط التداخل (طرح الطور المرجعي). يحل فك الطور هذا الغموض من خلال دمج فرق الطور بين وحدات البكسل المجاورة. بعد حذف أي عدد صحيح من ارتفاعات الغموض (ما يعادل عدداً صحيحاً من دورات الطور  $(2\pi)$  )، يوفر تباين الطور بين نقطتين على مخطط التداخل المسطح قياساً لتغير الارتفاع الفعلي (الشكل 8). وفقاً لذلك، يجب تفسير النتائج غير المغلفة على أنها ارتفاع / إزاحة نسبية بين وحدات بكسل الصورتين [2].



الشكل 8: مبدأ فك التفاف الطور (Phase Unwrapping)

تقتض معظم منهجيات فك الطور ثنائي الأبعاد أنه يتم أخذ عينات من البيانات بشكل كافٍ في معظم أجزاء المشهد. وفي هذه الحالة تتساوى تدرجات الطور غير المغلفة مع التدرجات المغلفة المرصودة، ويمكن الحصول على تقدير للطور غير المغلف للتداخل بسهولة من خلال تكامل هذه التدرجات المقدر.

ولكن معظم برامج التداخل تحتوي على تدرجات (Gradient) تتجاوز نصف دورة، وتكاملها غير الصحيح يؤدي إلى أخطاء عالمية ومن هنا تتبع صعوبة فك الطور. تنشأ هذه التدرجات التي توجد خارج المجال  $[-\pi, +\pi]$  بسبب كل من عدم الترابط والتغيرات المكانية الحقيقية للإشارات قيد الرصد. نسمي هذه التدرجات بالانقطاعات (Discontinuities). وبالتالي، تكمن مهمة خوارزمية فك الطور ثنائي الأبعاد بتحديد واستيعاب هذه الانقطاعات [20].

توجد ثلاث استراتيجيات لفك الطور [21] وهي:

1- أساليب تتبع المسار (Path-Following): يمكن تحديد مسار التكامل من خلال توزيع الرواسب (Residues) أو خريطة الجودة. تضمن هذه الطرق التطابق بين

المدخلات وأطراف الطور المعاد تغليفيها لنتيجة ( PU ) (ما يسمى التوافق الهامشي). هناك نوعان من هذه الطرق:

-الطرق المستندة إلى نظرية الرواسب: يمكن تلخيصها كمعايير توازن الرواسب. ويمكن الكشف عن الرواسب بواسطة قيمة تكامل الحلقة لتدرجات الطور المقدر لكل ( 2 x 2 ) بكسل متجاور. هناك ثلاثة خيارات فقط لقيمة تكامل الحلقة هذه، أي ( 0 ) و (  $-2\pi$  ) (تسمى رواسب سلبية) و (  $+2\pi$  ) (تسمى رواسب إيجابية). ومن ثم، عندما يكون تكامل المسار المغلق صفراً، فإن نتيجة التكامل ستكون مستقلة عن مسار التكامل. وتحسب مقدرات تدرجات الطور المطلق بين البكسلات المتجاورة من العلاقة (22):

$$\hat{\Delta}_{\psi}(s, s - 1) = \begin{cases} \varphi(s) - \varphi(s - 1) & |\varphi(s) - \varphi(s - 1)| \leq \pi \\ \varphi(s) - \varphi(s - 1) - 2\pi & \varphi(s) - \varphi(s - 1) > \pi \\ \varphi(s) - \varphi(s - 1) + 2\pi & \varphi(s) - \varphi(s - 1) < -\pi \end{cases} \quad (22)$$

حيث:  $\hat{\Delta}_{\psi}(s, s - 1)$  هو مقدر تدرج الطور المطلق بين البكسل (s) والبكسل (s-1)  $\varphi(s) - \varphi(s - 1)$  هو تدرج الطور المغلف (الملتف).

حقل التدرج الناتج من هذه العلاقة هو ثنائي البعد (أفقي وشاقولي). نحصل على الطور المطلق لكل بكسل من خلال عملية تكامل بسيطة مع نقطة مرجعية معروفة. تعتبر خوارزمية قطوع الفرع ( Branch Cuts ) الأكثر تمثيلاً لهذه الطرق.

- أساليب موجهة بالجودة (Quality-Guided): تحاول هذه الطرق إنشاء مسار التكامل الذي يمر أولاً بالبكسل الأعلى جودة الذي توفره خريطة الجودة، مفترضة أنه من غير المحتمل أن تتسبب البكسلات ذات الجودة العالية في حدوث خطأ في الـ ( PU ). توفر هذه الطرق مبادلة فعالة بين زمن تشغيل الـ ( PU ) والدقة.

2- الأساليب القائمة على التحسين ( Optimization-Based Methods ): تستخدم هذه الطرق وظائف موضوعية ( Objective Functions ) مختلفة للتقليل، قدر الإمكان، من الفرق بين تدرجات الطور غير المغلفة والتدرجات المقدر [22]، [23]، [24]. أحد هذه الأساليب هي طريقة الحد الأدنى لتدفق التكلفة (MCF) ( the Minimum-Cost ) [25] Flow.



3- لأساليب المستندة إلى الإحصاء (Statistics-Based Methods): تحصل هذه الطرق على نتيجة (PU) من خلال تعظيم الاحتمال الشرطي لنتيجة (PU) بوجود الطور المغلف المعطى.

تعتبر طريقة (SNAPHU) المقترحة في [26] واحدة من أكثر الأساليب القائمة على الإحصاء تمثيلاً. يُستخدم نموذج التكلفة الإحصائية وتدفق الشبكة لحساب حل (PU) الأكثر احتمالاً.

تطرح هذه الخوارزمية فك الطور باعتباره مشكلة تقدير احتمالية لاحقة قصوى (MAP) (Maximum a Posteriori Probability). إذ يتم تحديد وظائف تكلفة القوس الذي يربط العقد المجاورة (nodes) المطابقة للرواسب الإيجابية والسلبية بحيث يؤدي تقليل التكلفة الإجمالية إلى زيادة احتمال الحل غير المغلف إلى الحد الأقصى تقريباً نظراً لبيانات الإدخال التي يمكن رصدها. تتشكل دوال التكلفة هذه من اللوغاريتمات السالبة لوظائف كثافة الاحتمال غير المغلفة (PDFs) كما في العلاقة التالية:

$$g_k(\Delta\phi_k, \Delta\psi_k) = -\log(f(\Delta\phi_k|\Delta\psi_k, I, \rho)) \quad (23)$$

حيث:  $g_k$  دالة (وظيفة) التكلفة،  $\Delta\phi_k$  تدرجات الطور المغلف و  $\Delta\psi_k$  تدرجات الطور غير المغلف

$I$  متوسط شدة صور (SAR) المشكلة لمخطط التداخل

$\rho$  مقدار معامل الارتباط المركب للتداخل

ونظراً لأن طريقة (SNAPHU) تستخدم إجراء تحسين تكراري، فإن وقت تنفيذه يعتمد على صعوبة مخطط التداخل. يتم فيها تقسيم مخطط تداخل كبير إلى بلاطات (Tiles) بها عدد من الصفوف والأعمدة في التقسيم. باستخدام خيار البلاط، يتم تشغيل تحسين هذه الطريقة على كل بلاطة على حدة، والذي يستخدم ذاكرة ووقتاً أقل من القيام بالتحسين على مخطط التداخل الكامل. في النهاية، تأخذ الطور غير المغلف من كل بلاطة وتستخدم التداخل مع البلاطات المجاورة لتقدير الإزاحة الإجمالية لكل بلاطة بالنسبة للبلاطات الأخرى وإعداد طور نهائي غير مغلف لمخطط التداخل الكامل.

من أجل تنفيذ فك النطاق الطور، نقوم باستخدام الأداة (Snapu Export) لتحويل مخطط التداخل كطور مغلف إلى تنسيق يمكن تشغيله بواسطة أداة الـ (Snapu)، حيث

يمكن بدء عملية فك التغليف من داخل الـ ( SNAP ) عن طريق تحديد مشغل ( Snaphu - Unwrapping ) لا يحتوي الطور المفتوح غير المغلف على أي بيانات وصفية أو ترميز جغرافي للمنتج. إذ يقوم برنامج الـ ( Snaphu ) بتحويله مرة أخرى إلى تنسيق مناسب يحتوي على البيانات الوصفية المطلوبة من المنتج قبل عملية فك التغليف كونهما ينتميان إلى نفس الشكل الهندسي وعندها تتم عملية الاستيراد باستخدام الأداة ( Snaphu Import ).

#### 3.5.4 تحويل طور التداخل إلى ارتفاع ( Phase to Elevation )

الطور غير المغلف هو عبارة عن خطوط نقطية مستمرة ولكنها ليست مقياساً مترياً بعد. لتحويل وحدات الراديات إلى ارتفاعات، يتم تشغيل إجراء ( phase to elevation ) وبالتالي يصبح لكل بكسل قيمة مترية تشير إلى الارتفاع .

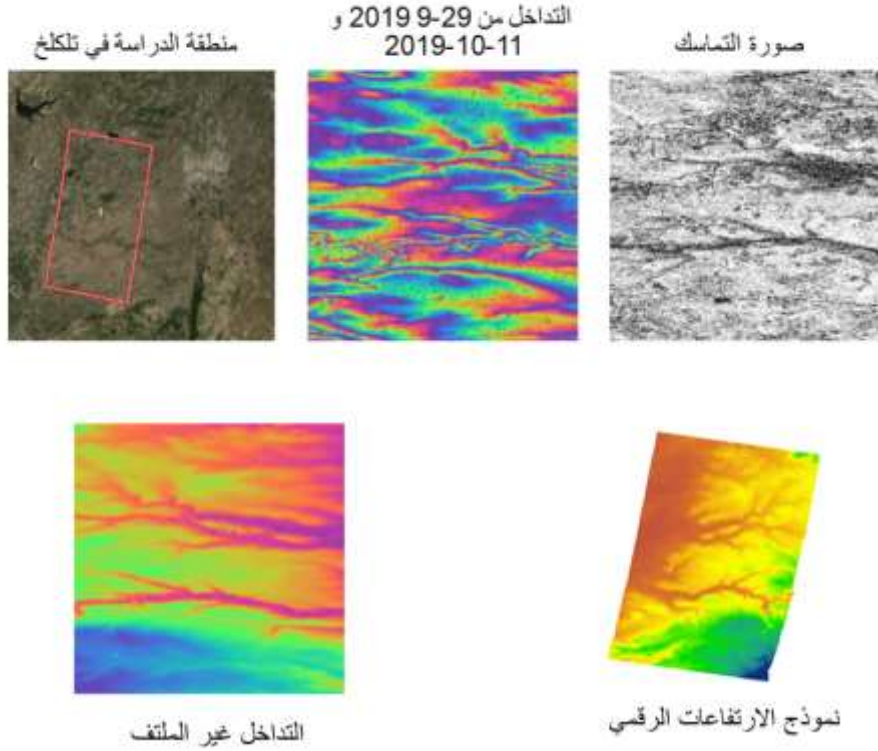
#### 3.5.5 تصحيح التضاريس ( Terrain Correction )

يعمل تصحيح التضاريس على ترميز الصورة جغرافياً عن طريق تصحيح التشوهات الهندسية لـ ( SAR ) بسبب هندسة الإضاءة، وذلك باستخدام نموذج الارتفاع الرقمي ( SRTM1sec ) ونحصل على منتج مُسقط على الخريطة. يحول الترميز الجغرافي الصورة من هندسة النطاق المائل أو هندسة النطاق الأرضي إلى نظام إحداثيات خريطة، وذلك بتطبيق منهجية ( Range Doppler Terrain Correction ) باستخدام عامل تصحيح التضاريس ( Range Doppler Terrain Correction )

## 4 النتائج ومناقشتها

باستخدام برنامج ( ArcMAP ) تم استخراج ارتفاعات ( 200 ) نقطة تم قياسها حقلياً ضمن أعمال المسح الأرضي في منطقتي تلكلخ والقرينين في نماذج الارتفاعات الرقمية التي تم حسابها لأزواج الصور في الجدول (1) باستخدام برنامج ( SNAP 8 ). يبين الشكل (9) خطوات توليد ( DEM ) للصورتين بتاريخ ( 2019-9-29 ) و ( 2019-10-11 ) في منطقة تلكلخ. تم حساب الفروق بين الارتفاعات المستخرجة و ارتفاعات النقاط الحقلية المقاسة، كذلك المتوسط ( MEAN ) والانحراف المعياري ( SD ) لهذه الفروق من أجل تقييم دقة نماذج الارتفاعات المشتقة وحساب جذر الخطأ المتوسط التربيعي ( RMSE ). إذ يعد الـ ( MEAN ) والـ ( RMSE ) أكثر المقاييس شيوعاً في معظم الدراسات من أجل إجراء تقييم

الدقة الإحصائية لأنها حساباتهما تستند إلى مرجع ( DEM ) ذي جودة أعلى أو نقاط حقلية، و تعطي مقياساً للانحراف بالأمتار، وهو أمر يسهل تفسيره [2].



الشكل(9): خطوات توليد الـ ( DEM ) من صورتي ( Sentinel1 ) في تكلخ

#### 4.1 تأثير خط الأساس الزمني

لتوضيح تأثير خط الأساس الزمني على جودة تحليلات قياس التداخل، يجب أن تكون قيمة خط الأساس العمودي متساوية أو متقاربة ومن أجل المدار نفسه صاعد أو هابط. يبين الشكل(10) صور التماسك الناتجة من أجل خطي الأساس الزمنيين ( 12 ) و ( 60 ) يوماً وخطي أساس عموديين متقاربين ( 143 ) متر و ( 153 ) متر في منطقة تكلخ في حالة المدار الهابط ، وكما يبدو واضحاً وجود مناطق التماسك العالي (اللامعة البيضاء) في صورة

التماسك من أجل ( 12 ) يوماً بينما نلاحظ انخفاض التماسك مع تزايد خط الأساس الزمني وتظهر مناطق التماسك المنخفض (المظلمة) بشكل واضح في صورة التماسك من أجل ( 60 ) يوماً، وهذا ما تؤكد قيم ( RMSE ) للارتفاعات المستخرجة حيث تكون قيمتها أكبر من أجل خط الأساس الزمني ( 60 ) يوماً وبالتالي تكون دقة الارتفاع أقل .



صورة التماسك من أجل 60 يوماً (Min=0.04 , Max=0.75)



صورة التماسك من أجل 12 يوماً (Min=0.08 , Max=0.86)

الشكل 10: صور التماسك من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و (60) في منطقة تللكخ في حالة المدار الهابط والقيم الدنيا والعظمى للتماسك في الحالتين

يوضح الجدول (2) القيم الدنيا (Min) والعليا (Max) للارتفاعات المشتقة في حالة المدار الهابط في تللكخ من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(60) يوماً، كذلك قيم (MEAN) و (SD) للفروقات (Diff) (حيث Diff = ارتفاع النقطة الحقلية المستخرج في النموذج DEM - ارتفاع النقطة الحقلية المقاسة) وقيمة (RMSE) للارتفاعات المشتقة. حيث نلاحظ تناقص قيم (SD) و (RMSE) بتناقص خط الأساس الزمني وتزداد بالتالي دقة نموذج الارتفاع المشتق في منطقة تللكخ.

حيث: (SD) هو الانحراف المعياري للفروقات (الجذر التربيعي لنتائج قسمة مجموع مربعات انحرافات قيم (Diff) عن متوسط هذه الفروقات على عدد النقاط (200)).

أما (RMSE) جذر الخطأ المتوسط التربيعي للارتفاعات المشتقة و هو (الجذر التربيعي لنتائج قسمة مجموع مربعات انحرافات قيم الارتفاعات المشتقة عن القيم الحقيقية المقاسة على عدد النقاط (200)).

الجدول(2):القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات ( InSAR ) في حالة المدار الهابط في منطقة تلكلخ من أجل خطي الأساس الزمنيين ( 12 ) و ( 60 ) يوماً

DEM	Min(m)	Max(m)	Diff		RMSE(m)
			MEAN(m)	SD(m)	
النقاط الحقيقية	195.523	370.417	-	-	-
InSAR(12)	195.444	397.412	5.02	11.58	12.62
InSAR(60)	207.037	422.313	4.13	22.32	22.70

يوضح الجدول (3) القيم الدنيا ( Min ) والعليا ( Max ) للارتفاعات المشتقة في حالة المدار الهابط في القرينتين من أجل خطي الأساس الزمنيين ( 12 ) و ( 96 ) يوماً، كذلك قيم ( MEAN ) و ( SD ) للفروقات ( Diff ) وقيمة ( RMSE ) للارتفاعات المشتقة. حيث نلاحظ أيضاً تناقص قيم ( SD ) و ( RMSE ) بتناقص خط الأساس الزمني وتزداد بالتالي دقة نموذج الارتفاع المشتق في منطقة القرينتين.

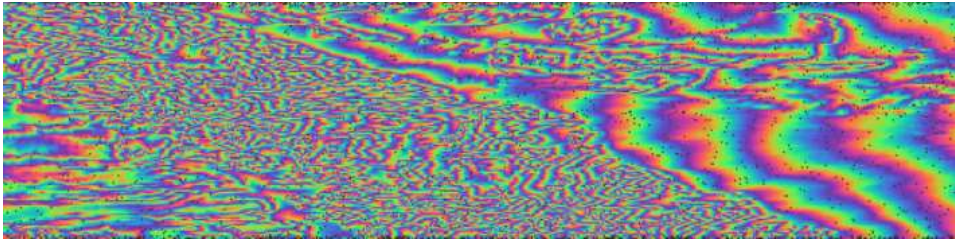
الجدول(3): القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات ( InSAR ) في حالة المدار الهابط في منطقة القرينتين من أجل خطي الأساس الزمنيين ( 12 ) و ( 96 ) يوماً

DEM	Min(m)	Max(m)	Diff		RMSE(m)
			MEAN(m)	SD(m)	
النقاط الحقيقية	724.871	790.578	-	-	-
InSAR(12)	705.179	780.230	-3.06	7.44	8.04
InSAR(96)	756.433	823.142	34.04	7.62	34.83

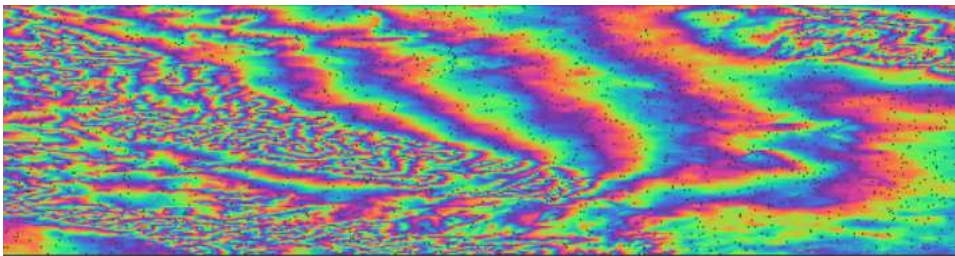
## 4.2 تأثير خط الأساس العمودي

لتوضيح تأثير خط الأساس العمودي يجب ان يكون لدينا نفس خط الأساس الزمني واتجاه المدار. يوضح الشكل(11) مخططات التداخل الناتجة من أجل خطي الأساس العموديين ( 176 م) و( 82 م ) وخطي أساس زمنيين متقاربين ( 6 ) و( 12 ) يوماً في منطقة القريتين في حالة المدار الصاعد. يتم تمثيل فرق الارتفاع بدورة طور واحدة تزداد مع خطوط أساس عمودية أصغر، لذلك تكون أزواج الصور ذات خطوط الأساس العمودية الصغيرة أقل حساسية لاختلافات الارتفاع كما توضح المعادلة (13).

نلاحظ فقدان معلومات الارتفاع لخطوط الأساس العمودية الأصغر والكمية المتزايدة من ضجيج الطور. يشار إلى ذلك أيضًا من خلال الزيادة الكبيرة في قيم الـ ( RMSE ) للارتفاعات المشتقة.



مخطط التداخل لزوج الصور  $b_{\perp} = 176$  (RMSE=10.67m)



مخطط التداخل لزوج الصور  $b_{\perp} = 82$  (RMSE=68.77)

الشكل 11: مخططات التداخل من أجل خطوط أساس عمودية ( 82 م) و(176م) في منطقة القريتين في حالة المدار الصاعد

يتم عرض مخطط التداخل في مقياس ألوان قوس قزح يتراوح من  $(-\pi)$  إلى  $(+\pi)$ . تمثل الأنماط، التي تسمى أيضاً "الهوامش" ( Fringes )، دورة  $( 2\pi )$  كاملة وتظهر في مخطط التداخل كدورات من الألوان العشوائية، حيث تمثل كل دورة نصف الطول الموجي للمستشعر. لاشتقاق الـ ( DEM ) بجودة كافية، يجب أن تكون هذه الهوامش مرئية في جميع أنحاء الصورة.

يوضح الجدول (4) قيم الـ ( RMSE ) للارتفاعات المشتقة و القيم الإحصائية للفروق بين الارتفاعات المستخرجة للنقاط وارتفاعات النقاط الحقلية المقاسة في منطقتي تلكخ والقريتين في حالة المدار الصاعد من أجل خطي الأساس العموديين ( 82 م ) و ( 176 م ). حيث نلاحظ تناقص قيم ( SD ) و ( RMSE ) بتزايد قيمة خط الأساس العمودي وتزداد بالتالي دقة الارتفاعات المشتقة في منطقتي الدراسة .

الجدول(4): القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات ( InSAR ) في حالة المدار الصاعد من أجل خطي الأساس العموديين ( 82 م ) و ( 176 م ) في تلكخ والقريتين

القريتين					
DEM	Min(m)	Max(m)	Diff		RMSE(m)
			MEAN(m)	SD(m)	
النقاط الحقلية	724.871	790.578	-	-	-
InSAR(176)	729.037	795.057	9.67	4.51	10.67
InSAR(82)	734.815	874.859	65.88	20.41	68.77
تلكخ					
النقاط الحقلية	195.523	370.417	-	-	-
InSAR(176)	248.087	418.493	45.76	6.84	46.27
InSAR(82)	344.178	512.014	144.89	34.35	148.91

#### 4.3 تأثير اتجاه حركة القمر

ومن أجل دراسة تأثير اتجاه حركة القمر في المدارات الصاعدة والهابطة على التشوهات الهندسية وبالتالي انتشار الأخطاء خلال معالجة التداخل وتأثيرها على دقة الارتفاعات الناتجة. لم نتمكن من الحصول على خطوط أساس زمنية وعمودية متساوية في حالة المدار الهابط، لذا تمت المقارنة بين نماذج الارتفاع المشتقة في منطقتي تللكخ والقريتين في حالة المدار الصاعد فقط ومن أجل خطوط الأساس العمودية والزمنية نفسها الجدول(5).

الجدول(5): القيم الإحصائية لنماذج الارتفاعات ( InSAR ) في حالة المدار الصاعد في  
تللكخ و القريتين من أجل خطوط الأساس الزمنية والعمودية نفسها

DEM_ InSAR	خط الأساس الزمني (يوم)	خط الأساس العمودي (متر)	القريتين		تللكخ	
			SD(m)	RMSE(m)	SD(m)	RMSE(m)
1	36	119	10.02	14.01	32.02	68.54
2	12	82	20.41	68.77	34.35	148.91
3	6	176	4.51	10.67	6.84	46.27

نلاحظ أن قيم ( RMSE ) و( SD ) تتناقص في القريتين عند مقارنتها بالقيم في منطقة تللكخ من أجل خطوط الأساس العمودية والزمنية نفسها و بالتالي نموذج الارتفاع أكثر دقة في القريتين في حالة المدار الصاعد عند مقارنته مع نموذج الارتفاع في تللكخ ومن أجل نفس خطوط الأساس.

كذلك تمت المقارنة بين نماذج الارتفاعات المشتقة في حالتي المدار الصاعد والهابط في تللكخ حيث كان من الصعب الحصول على خطوط أساس زمنية وعمودية متساوية. يوضح الجدول (6) القيم الإحصائية للارتفاعات المشتقة، والتي تظهر أن نماذج الارتفاعات في تللكخ في حالة المدار الهابط أكثر دقة من النماذج في حالة المدار الصاعد.



الجدول(6): القيم الإحصائية لنماذج الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الصاعد والهابط في تلكلخ

المدار الصاعد				
DEM_ InSAR	خط الأساس الزمني (يوم)	خط الأساس العمودي (متر)	SD(m)	RMSE(m)
1	36	119	32.02	68.54
2	12	82	34.35	148.91
3	6	176	6.84	46.27
المدار الهابط				
1	96	172	12.88	14.67
2	60	153	22.32	22.70
3	12	143	11.58	12.62

## 5 الاستنتاجات والتوصيات

أظهرت هذه الدراسة أنه من الممكن إنشاء (DEMs) بناءً على قياس التداخل بالرادار بواسطة صور القمر (Sentinel-1) عند تحقيق المتطلبات الأساسية، من طول خطوط الأساس الزمنية والعمودية. إذ يتحكم خط الأساس الأول في المقدار المتوقع لعدم الترابط الزمني على الأسطح الطبيعية بينما يحدد الثاني مقدار تغير الارتفاع، والذي تمثله دورة الطور. بالإضافة إلى تقليل تأثير العوامل الجوية والتشوهات الهندسية الناتجة عن هندسة الاستحواذ الجانبي واتجاه حركة القمر.

تمت دراسة تأثير البارامترات المختلفة على جودة قياس التداخل وبالتالي دقة الارتفاعات المشتقة. تبين أنه إذا تم اختيار أزواج الصور المناسبة التي تحقق أقل فاصل زمني (6) أيام و بنفس الوقت امتلاك أزواج الصور هذه خط أساس عمودي مناسب بين (150 م) و (300 م) للحصول على أقل قيمة لارتفاع الغموض ولتقليل تأثير العوامل الجوية. وإذا تم استيفاء الشروط الفنية لتقليل مناطق عدم التماسك وتقليل انتشار الأخطاء خلال عملية فك الطور، يمكننا إنشاء الـ (DEM) بدقة جيدة.

نموذج الارتفاع الرقمي المشتق في دراستنا في منطقتي تلكلخ والقريتين في حالة المدار الهابط أدق من النموذج المشتق في حالة المدار الصاعد. كذلك، كان نموذج الارتفاع الرقمي في حالة المدار الصاعد أكثر دقة في القريتين من نموذج الارتفاع المشتق في منطقة تلكلخ من أجل العوامل المؤثرة نفسها.

مع بيانات ( InSAR ) المتوفرة بكثرة ومجاناً واستمراريتها بواسطة الـ ( Sentinel-1 ) يمكن إنتاج نموذج ارتفاع رقمي بمواصفات معينة من حيث الدقة لتطبيق معين مثل دراسة الانهيارات الأرضية حيث توجد مزيد من التحقيقات في ملاءمة ( Sentinel-1 ) لتقدير حجم الانهيارات الأرضية. يجب التركيز في الدراسات المستقبلية على دمج الصور ذات التواريخ المتعددة والمسارات الصاعدة والهابطة بدلاً من نهج زوج الصور الواحد لتقليل الأخطاء المحتملة والمنتشرة خلال عملية فك الطور وبالتالي زيادة دقة الارتفاعات الناتجة.

## 6 المراجع

- [1] Nuthammachot, Narissara, Askar Askar, Dimitris Stratoulis, and Pramaditya Wicaksono. "Combined use of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for improving above-ground biomass estimation." Geocarto International (2020): 1-11.
- [2] Braun, A. "DEM Generation with Sentinel-1 Workflow and Challenges." SkyWatch Space Applications Inc.: Waterloo, ON, Canada (2020).
- [3] Soni C, Chaudhary A, Sharma U, Sharma C. Satellite radar interferometry for DEM generation using Sentinel-1A imagery. In: Sharma MK, Dhaka VS, Perumal T, Dey N, Tavares JMRS, editors. Innovations in computational intelligence and computer vision. Singapore: Springer; 2021. p. 26–33. doi: 10.1007/978-981-15-6067-5\_4.
- [4] Crosetto M. Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation. ISPRS J Photogram Remote Sens. 2002; 57:213–27. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00107-7.
- [5] Nonaka T, Asaka T, Iwashita K, Ogushi F. The relationships between errors of DEM and the height of ambiguity of Sentinel-1. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; 28 July–02 September 2019. Yokohama: IEEE; 28 July–02 September 2019. p. 1725–8. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8899305.

- [6] Letsios V, Farasalis I, Stathakis D. InSAR DSM using Sentinel- 1 and spatial data creation, 17–20 June 2019, Limassol, Cyprus: Association of Geographic Information Laboratories in Europe (AGILE); 2019. p. 1–4.
- [7] Ortone Lois AS. Generation of DEMs in Los Glaciares National Park, in order to complement information related to elevation studies within the National Park and mass balance studies of Viedma Glacier and Frías Glacier: Original title: Generación de DEMs en el Parque Nacional Los Glaciares, con el objeto de complementar información relativa a estudios de elevación dentro del Parque Nacional y estudios de balance de masas del Glaciar Viedma y Glaciar Frías, 27–29 May 2020. Argentina: Buenos Aires; 2020. p. 1–15.
- [8] Ghannadi, Mohammad Amin, Saeedeh Alebooye, Moein Izadi, and Amirreza Moradi. "A method for Sentinel-1 DEM outlier removal using 2-D Kalman filter." Geocarto International (2020): 1-15.
- [9] Geudtner, Dirk Torres, Paul Snoeij, Allan Ostergaard, Igancio Navas-Traver, Bjorn Rommen, and Michael Brown. "Sentinel-1 system overview and performance." In ESA Living Planet Symposium, vol. 722, p. 96. 2013.
- [10] F. De Zan and Andrea Monti Guarnieri, "TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, No. 9, September 2006, pp 2352-2360.
- [11] Ferretti, Alessandro, Andrea Monti-Guarnieri, Claudio Prati, and Fabio Rocca. "InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, 19 vols." The Netherlands: ESA Publications (2007).
- [12] Pepe, Antonio, and Fabiana Calò. "A review of interferometric synthetic aperture RADAR (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth's surface displacements." Applied Sciences 7, no. 12 (2017): 1264.
- [13] Franceschetti, G.; Lanari, R. Synthetic Aperture Radar Processing; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1999.
- [14] Xia, Ye. "Synthetic aperture radar interferometry." Sciences of Geodesy-I, pp. 415-474. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [15] Bähr, Hermann. Orbital effects in spaceborne synthetic aperture radar interferometry. KIT Scientific Publishing, 2013

- [16] Hanssen, Ramon F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. Vol. 2. Springer Science & Business Media, 2001.
- [17] Schwabisch, M., and D. Geudtner. "Improvement of phase and coherence map quality using azimuth prefiltering: Examples from ERS-1 and X-SAR." International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'95. Quantitative Remote Sensing for Science and Applications, vol. 1, pp. 205-207. IEEE, 1995.
- [18] Hellwich, Olaf. "Basic principles and current issues of SAR interferometry." Joint Workshop of ISPRS WGI/1, I/3 and IV/4, Sensors and Mapping from Space. 1999.
- [19] Goldstein, Richard M., and Charles L. Werner. "Radar interferogram filtering for geophysical applications." Geophysical research letters 25, no. 21 (1998): 4035-4038.
- [20] Chen, Curtis W. "Statistical-cost network-flow approaches to two-dimensional phase unwrapping for radar interferometry." (2001).
- [21] Yu, Hanwen, Yang Lan, Zhihui Yuan, Junyi Xu, and Hyongki Lee. "Phase unwrapping in InSAR: A review." IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine 7, no. 1 (2019): 40-58.
- [22] H. Yu, M. Xing, and Z. Bao, "A fast phase unwrapping method for large-scale interferograms," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 51, no. 7, pp. 4240–4248, 2013.
- [23] R. Yamaki and A. Hirose, "Singularity-spreading phase unwrapping," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 45, no. 10, pp. 3240–3251, 2007.
- [24] H. Yu, Z. Li, and Z. Bao, "Residues cluster-based segmentation and outlier-detection method for large-scale phase unwrapping," IEEE Trans. Image Process., vol. 20, no. 10, pp. 2865–2875, 2011.
- [25] M. Costantini, "A novel phase unwrapping method based on network programming," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 36, no. 3, pp. 813–821, 1998.
- [26] C. W. Chen and H. A. Zebker, "Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization," J. Opt. Soc. Amer. A, Opt. Image Sci., vol. 18, no. 2, pp. 338–351, 2001.