

 <p>SAHEL ALMARIFAH JOURNAL</p>	<p>مجلة ساحل المعرفة للعلوم الإنسانية والتطبيقية Sahel Almarifah Journal of Humanities and Applied Sciences تصدر عن الأكاديمية الليبية فرع الساحل الغربي المجلد الثاني-عدد خاص-S1 الصفحات (E-26 - E-1)</p>	 <p>الأكاديمية الليبية The Libyan Academy فرع الساحل الغربي</p>
--	--	--

## تحليل تأثير الخصائص الطبوغرافية وخطوط الأساس على دقة نماذج الارتفاعات الرقمية المستخرجة بتقنية InSAR

دارين جابر نوفل<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> قسم الهندسة الطبوغرافية، كلية الهندسة المدنية، الجامعة الوطنية الخاصة، حماه، سوريا.

[dareen-nofl@wpu.edu.sy](mailto:dareen-nofl@wpu.edu.sy) \*

### Analysis of the Impact of Topographic Features and Baselines on the Accuracy of Digital Elevation Models Extracted Using InSAR Technique

Dareen Jaber Nofl<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Topographic Engineering Department, Civil Engineering Faculty, Wataniya Private University, Hama, Syria.

#### المخلص

تُعد نماذج الارتفاعات الرقمية (DEM) ركيزة أساسية في العديد من التطبيقات الجيومكانية والهندسية والبيئية، لما توفره من تمثيل دقيق للبنية الطبوغرافية للسطح. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير مجموعة من العوامل المؤثرة في دقة النماذج المستخرجة بتقنية التداخل بالرادار ذي الفتحة الاصطناعية (InSAR)، وتشمل اتجاه مدار القمر الصناعي (صاعد/هابط)، وطول خط الأساس الزمني، وطول خط الأساس العمودي، إضافة إلى طبيعة التضاريس وكثافة الغطاء النباتي. وقد تم الاعتماد على بيانات القمر الصناعي Sentinel-1 نمط (IW-SLC) ضمن تركيبات متعددة من ثنائيات الصور بهدف تقييم جودة وموثوقية نماذج الارتفاعات الرقمية الناتجة.

شملت الدراسة منطقتين متباينتين طبوغرافياً: منطقة سهلية منخفضة الانحدار وضعيفة الغطاء النباتي، ومنطقة ذات تضاريس وعرة وكثيفة الغطاء النباتي. أظهرت النتائج أن قصر خط الأساس الزمني يسهم بشكل ملحوظ في تعزيز معامل التماسك (Coherence) وتحسين دقة النموذج في كلا النمطين التضاريسيين، كما تبين أن المدار الهابط يوفر أداءً أفضل وأكثر ملاءمة من المدار الصاعد في الحصول على نماذج ارتفاع رقمية أكثر دقة في منطقتي الدراسة. وسُجلت أدنى قيمة لجذر الخطأ المتوسط التربيعي (RMSE) في المنطقة السهلية، في حين ارتفعت قيم الخطأ في المنطقة الوعرة نتيجة تأثيرات عدم الترابط الزمني وتعقيد البنية الطبوغرافية.

تلخص الدراسة إلى أن تحسين اختيار خطوط الأساس يمثل عاملاً حاسماً في رفع كفاءة استخراج نماذج الارتفاعات الرقمية باستخدام بيانات Sentinel-1، مع ارتباط مباشر بطبيعة السطح المدروس وخصائصه المورفولوجية.

**الكلمات الدالة:** التداخل بالرادار ذي الفتحة الاصطناعية، التماسك، المدار الصاعد والهابط، النموذج الرقمي للارتفاعات (DEM)، خط الأساس الزمني.

## Abstract

Digital Elevation Models (DEMs) represent a fundamental dataset in a wide range of geospatial, engineering, and environmental applications, as they provide a precise quantitative description of surface morphology. This study investigates the influence of key acquisition and terrain-related parameters on the accuracy of DEMs derived through Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) processing. The examined factors include satellite orbit direction (ascending/descending), temporal baseline length, perpendicular baseline length, terrain morphology, and vegetation density. The analysis is based on multiple interferometric pairs acquired in IW-SLC mode from the Sentinel-1 mission, allowing for a systematic evaluation of DEM quality and reliability under varying geometric configurations.

Two topographically contrasting environments were considered: a flat area characterized by gentle slopes and sparse vegetation cover, and a rugged area characterized by steep relief and dense vegetation. The results reveal a strong dependency between temporal baseline length and interferometric coherence, with shorter temporal baselines significantly enhancing phase stability and improving elevation accuracy in both terrain settings. Moreover, descending orbit acquisitions consistently outperformed ascending configurations in terms of reducing elevation errors. The lowest Root Mean Square Error (RMSE) values were obtained over the flat terrain, whereas higher errors were observed in the rugged environment due to pronounced temporal decorrelation and increased topographic complexity.

The findings highlight that baseline optimization is a critical determinant of InSAR-derived DEM accuracy and that terrain morphology plays a decisive role in controlling coherence preservation and elevation precision. These results provide practical guidance for optimizing Sentinel-1 acquisition strategies for reliable topographic mapping across diverse landscape conditions.

**Keywords:** Ascending and descending orbit, coherence, Digital Elevation Model (DEM), Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), and temporal baseline.

## 1. مقدمة

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، كما أنها مصدر البيانات الأساسي الذي يسمح بفهم ومراقبة ودراسة تغيرات سطح الأرض من هبوطات وإزاحات رأسية وأفقية، وتقسيم المناطق المعرضة لخطر الانهيارات الأرضية، ونمذجة المصادر الزلزالية، وما إلى ذلك.

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). كما أن النماذج الرقمية للارتفاعات المستنبطة من القياسات الأرضية (مساحة أرضية أو تصويرية) دقيقة ولكنها تغطي جزءاً صغيراً من الأرض ومكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً في الإنشاء.

يعتبر قياس التداخل بالرادار ذي الفتحة الاصطناعية (InSAR) من الطرق الفعالة لتوليد الـ (DEM). ولقد ثبت أن InSAR هي تقنية راسخة لتوليد نماذج DEM عالية الجودة من البيانات المحمولة جواً وفضائياً، ولها مزايا مقارنة بالطرق الأخرى لتوليد نماذج DEM ذات مساحة كبيرة. ومع ذلك، فإن معالجة بيانات InSAR لا تزال مهمة صعبة. لكل زوج صور محدد، يجب تنفيذ العديد من خطوات المعالجة. أحد التحديات الحالية لتطبيق InSAR هو الارتقاء بالتقنيات إلى مستوى يمكن من خلاله تنفيذ توليد DEM على أساس تشغيلي.

تمت العديد من الدراسات البحثية لتحسين دقة وموثوقية نماذج الارتفاع الرقمية (DEMs) التي تعتمد على تقنية (InSAR). في بعض الدراسات تم التركيز على دراسة البارامترات المؤثرة في دقة النماذج المولدة بهذه التقنية، فمثلاً في بعض الدراسات تم دراسة تأثير خط الأساس الزمني وتأثيره القوي على جودة التماسك وبالتالي دقة النموذج المقدر، ولكن لم يتم الإشارة أو دراسة تأثير قيمة خط الأساس العمودي [1]، كما لم يتم دراسة تأثير نوع المسار أو طبيعة التضاريس في المنطقة أو كثافة الغطاء النباتي [2].

دراسات أخرى بينت تأثير وجود الغطاء النباتي ووعورة وانحدار سطح الأرض ووضحت هذه الدراسات أن هناك تدهوراً شديداً في جودة الطور بسبب تأثير الغطاء النباتي والمنحدرات الحادة [3]، ولكن هذه الدراسات لم تأخذ تأثير البارامترات الأخرى.

بشكل عام، ساهمت الدراسات البحثية في هذا المجال بشكل كبير في تطوير وتحسين تقنيات توليد DEMs باستخدام InSAR. ولكن لا يوجد دراسة ناقشت تأثير تركيبة من البارامترات الملائمة وغير الملائمة معاً على جودة دقة النماذج المولدة، فكما نعرف لا يتوافر دائماً البارامترات الملائمة كافة معاً، وعليه فإنه في حال وجود بارامترات ملائمة وأخرى غير ملائمة، لا يوجد منهجية واضحة لاختيار ترتيب هذه البارامترات. من هنا تأتي ضرورة دراسة التركيبات المختلفة للمعاملات المستخدمة وتحديد التركيبة المناسبة لإنشاء نماذج رقمية للارتفاعات وفقاً لمنطقة الدراسة.

تعتمد دقة المنتج على مجموعة من البارامترات التي لا بد من دراستها ودراسة تأثير مجموعة من المعاملات الملائمة وغير الملائمة ضمن تركيبات مختلفة لتقييم جودة وموثوقية النماذج الرقمية للارتفاعات (DEMs) المولدة باستخدام تقنية التداخل الراداري من بيانات القمر الصناعي Sentinel-1. بحيث يتم دراسة تأثير عدة عوامل على دقة DEM، بما في ذلك اتجاه طيران القمر الصناعي وخطوط الأساس العمودية والزمانية وطبيعة تضاريس المنطقة المدروسة وكثافة الغطاء النباتي.

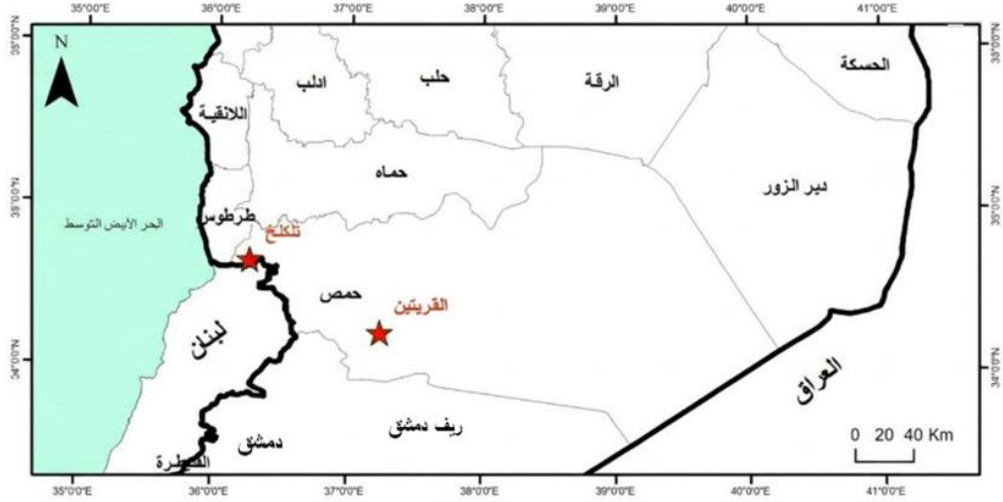
لتنفيذ هذه المنهجية تم إجراء دراسة مقارنة حول جودة وموثوقية الـ (DEM) المولد باستخدام تقنية التداخل الراداري من بيانات القمر الصناعي (Sentinel-1) عن طريق معالجة (11) زوجاً من الصور في منطقتي تلكلخ والقرينتين في مدينة حمص في سورية، ودراسة تأثير خط الأساس الزمني والعمودي واتجاه طيران القمر الصناعي المساعد والهابط على جودة مخططات التداخل والتماسك وبالتالي قيم الارتفاعات الناتجة. كما تم تقييم الدقة وإجراء مقارنة إحصائية لقيم الارتفاعات المشتقة مع قيم ارتفاعات مجموعة من النقاط المقاسة حقلياً في منطقتي الدراسة.

تمت الاستفادة واستغلال برمجيات معالجة بيانات الرادار مفتوحة المصدر (SNAP) (Sentinel Applications Platform)، بالإضافة لاستخدام أدوات (SNAPHU) خوارزمية تدفق تكلفة الشبكة الإحصائية لفك الطور (a Statistical-Cost Network-Flow Phase Unwrapping) المقدمة على التوالي بواسطة وكالة الفضاء الأوروبية (ESA) وجامعة ستانفورد. وذلك، بهدف توليد نموذج (DEM) لمنطقة الدراسة في تلكلخ والقرينتين.

## 2. منطقة الدراسة والبيانات المستخدمة

تم اختيار منطقتين للدراسة، منطقة القرينتين ومنطقة تلكلخ الشكل (1)، وذلك بهدف دراسة تأثير البارامترات المختلفة على دقة الارتفاعات الناتجة باستخدام تقنية (InSAR) على منطقتين مختلفتين من حيث التضاريس والغطاء النباتي. تقع تلكلخ على مسافة (45 كم) إلى الغرب من مدينة حمص، وهي ذات طبيعة تضاريسية وعرة وترتفع عن سطح البحر حوالي (500

(م). تقع القرينتين على تخوم البادية السورية وإلى الجنوب الشرقي من مركز محافظة حمص بحوالي (85 كم) وتتميز بتضاريس سهلية وغطاء نباتي خفيف.  
يوضح الشكل (1) منطقتي الدراسة.



شكل 1. منطقة الدراسة.

من الأفضل الإبقاء على مساهمات الغلاف الجوي والضجيج الأخرى صغيرة قدر الإمكان لأنه من الصعب تقديرها. وألا تكون هناك إزاحة في السطح بين زمني استحواذ الصورتين، لذلك تم استخدام 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.  
تم تحميل البيانات المستخدمة من مركز الوصول المفتوح كوبرنيكوس، إذ تمت دراسة (11) زوجاً من الصور في حالة المدار الصاعد (Ascending) والهابط (Descending) في المنطقتين كما هو موضح في الجدول (1).  
جدول 1. أزواج الصور المستخدمة مع خطوط الأساس الزمنية والعمودية.

أزواج الصور من المدارات الصاعدة (ascending)				
الصورة التابعة Slave	الصورة الرئيسية Master	b_temp day خط الأساس الزمني	$b_{\perp}$ m خط الأس اس العمود ي	منطقة الدراسة

1	S1B_IW_SLC__1SDV_201 90904	S1B_IW_SLC__1SDV_20191 010	36	119	القرينتين
2	S1B_IW_SLC__1SDV_201 90928	S1B_IW_SLC__1SDV_20191 010	12	82	القرينتين
3	S1A_IW_SLC__1SDV_201 91004	S1B_IW_SLC__1SDV_20191 010	6	176	القرينتين
4	S1B_IW_SLC__1SDV_201 90904	S1B_IW_SLC__1SDV_20191 010	36	119	تلكخ
5	S1B_IW_SLC__1SDV_201 90928	S1B_IW_SLC__1SDV_20191 010	12	82	تلكخ
6	S1A_IW_SLC__1SDV_201 91004	S1B_IW_SLC__1SDV_20191 010	6	176	تلكخ
أزواج الصور من المدارات الهابطة (descending)					
1	S1B_IW_SLC__1SDV_201 90625	S1B_IW_SLC__1SDV_20190 929	96	172	تلكخ
2	S1B_IW_SLC__1SDV_202 00731	S1B_IW_SLC__1SDV_20190 929	60	153	تلكخ
3	S1B_IW_SLC__1SDV_201 91011	S1B_IW_SLC__1SDV_20190 929	12	143	تلكخ
4	S1B_IW_SLC__1SDV_201 91011	S1B_IW_SLC__1SDV_20190 929	12	151	القرينتين
5	S1B_IW_SLC__1SDV_201 90625	S1B_IW_SLC__1SDV_20190 929	96	177	القرينتين

### 3. منهجية معالجة البيانات لتوليد النموذج الرقمي للتضاريس

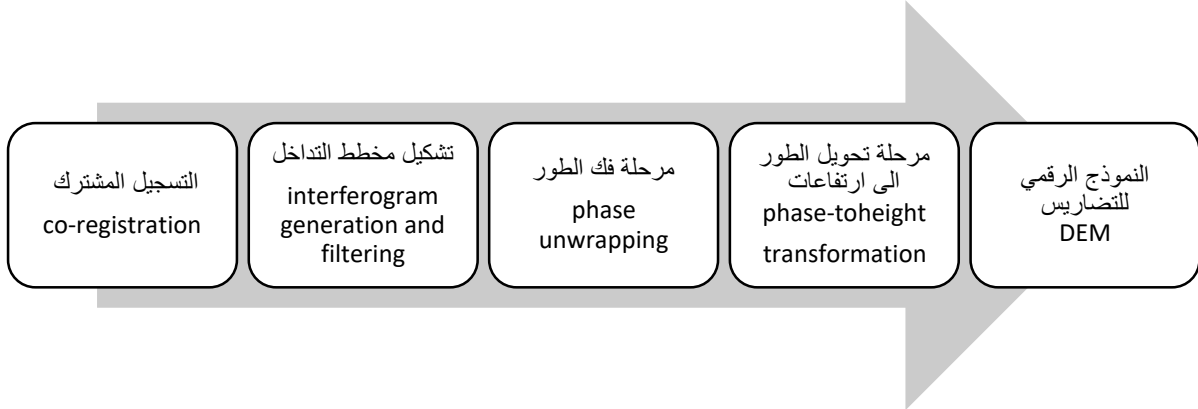
إن عملية معالجة البيانات لتوليد نموذج الرقمي للتضاريس باستخدام طريقة التداخل الراداري تتضمن عدة خطوات رئيسية. والتي تبدأ عادةً بتجميع البيانات لمنطقة الدراسة، من ثم يتم التسجيل المشترك للصور الرادارية التي حصلنا عليها حيث تعد هذه الخطوة أمراً أساسياً في إنشاء مخطط التداخل، لأنها تضمن أن كل هدف أرضي يساهم في نفس البكسل في كل من الصورة الرئيسية والتابعة. ومن الناحية العملية، يجب أن يأخذ التسجيل المشترك في الاعتبار انحراف المدارات وكذلك مواقع المستشعر المختلفة في استحواذ الصورتين بالإضافة لاختلاف معدل أخذ العينات بسبب اختلاف تردد تكرار النبض بين صورتين وسرعات المستشعر.

يتم تحديد متعدد الحدود للتسجيل المشترك الذي يصف تحويل الصورة التابعة إلى الصورة الرئيسية، والذي يستخدم لاحقاً لإعادة تشكيل الصورة التابعة إلى هندسة الصورة الرئيسية. تتضمن الخطوة التالية إنشاء مخطط التداخل المعقد وصورة

التماسك، حيث يتم تسجيل مخطط التداخل في نفس الهندسة المرجعية للصورة الرئيسية (السمت، النطاق المائل). بعد تشكيل التداخل وحساب طور التداخل والملف والذي هو عبارة عن الفرق بين طور الصورة الرئيسية وطور الصورة التابعة، يتم حساب الطور الناتج عن الأرض المسطحة وطرحه من مخطط التداخل، ويمكن تحسين وضوح نمط الهوامش في مخطط التداخل من خلال تطبيق عملية تصفية للضجيج على مخطط التداخل الذي تم طرح طور الأرض المسطحة منه وهكذا يمكن التقليل من أخطاء الخطوة التالية والمتمثلة بفق التفاف الطور. حيث تتم في هذه المرحلة إعادة بناء الطور غير الملف من تمثيل الطور الملف ويتم تحويل هذا الطور غير الملف الذي تم الحصول عليه إلى ارتفاع حيث يتم توليد نموذج رقمي للتضاريس (DEM) بناءً على هذه الارتفاعات. ثم تتم إزالة التشوهات الهندسية الناتجة عن الاستحواذ المائل وتتم إجراء التصحيحات الهندسية وإعادة ترميز جغرافي لمعلومات الصورة.

في آخر مرحلة يتم التحقق من صحة النموذج الرقمي للتضاريس وإجراء اختبارات الدقة باستخدام بيانات حقلية، مثل بيانات المسح الأرضي التقليدي أو عن طريق أنظمة تحديد المواقع العالمية. ويتم التحقق من دقة النموذج عن طريق حساب المعايير الإحصائية المختلفة.

تمثل هذه الخطوات العمليات الأساسية التي يتم اتباعها في معالجة البيانات وتوليد النموذج الرقمي للتضاريس باستخدام طريقة التداخل الراداري، في كل خطوة من الخطوات يتم اختيار العديد من البارامترات والخوارزميات المعالجة. ويبين المخطط التالي العمليات الأساسية المتبعة في عملية المعالجة.



هناك عدة برامج لمعالجة بيانات صور SAR، قمنا في هذا القسم بالاعتماد على برمجيات معالجة بيانات الرادار مفتوحة المصدر (SNAP).

لاستغلال اختلاف الطور في عمليات الاستحواذ للصورتين الرئيسية والتابعة، يجب إنشاء مكدس stack يحتوي على كلا المنتجين أولاً. ثم نقوم بتنفيذ التسجيل المشترك Coregistration للصورتين والذي يستخدم إحصائيات الصورة لمحاذاة كلا المنتجين بدقة البكسل الفرعي.

في البداية يتم اختيار الرقعة الفرعية (Subswath) والرشقات (Bursts) المناسبة لتحديد منطقة الدراسة واختزال كمية المعالجة من خلال تطبيق تقسيم S-1 TOPS على البيانات لتحديد تلك الرشقات المطلوبة للتحليل فقط. يتم تنفيذ أو تطبيق الإجراء (المشغل) (TOPSAR-Split)، لكل من الصورتين الرئيسية والتابعة للحصول على نفس الرقعة الفرعية ونفس بيانات الاستقطاب للتسجيل المشترك. تم اختيار الرقعة الفرعية IW2 والرشقات 8 و9 والاستقطاب VV في منطقة تلكوخ في حالة المدار الهابط لكل من الصورة الرئيسية والتابعة الشكل (2).

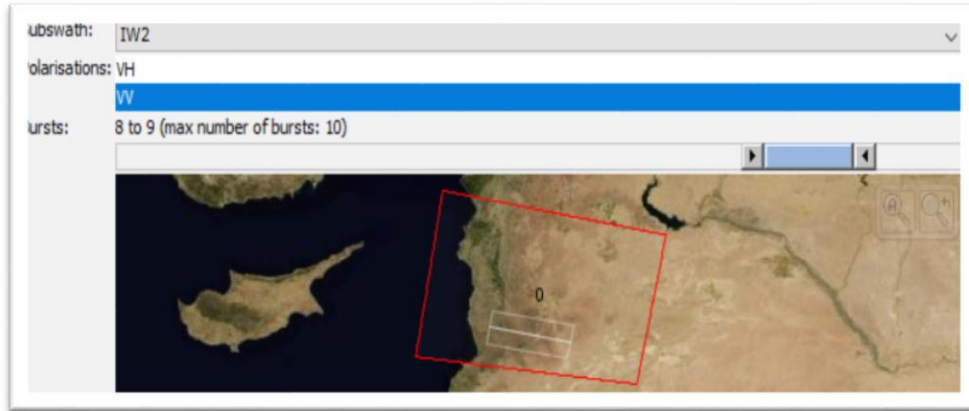
تحتوي البيانات المساعدة المدارية على معلومات حول موقع القمر الصناعي أثناء الحصول على بيانات SAR، حيث يتم تنزيلها تلقائياً لمنتجات Sentinel-1 بواسطة برنامج SNAP وإضافتها إلى بيانات التعريف الخاصة بها باستخدام الإجراء Apply Orbit File. نقوم بتنفيذ هذا الإجراء على كلتا الصورتين المقسمتين في الخطوة السابقة.

يقوم مشغل الترميز الجغرافي العكسي أو الخلفي Back Geocoding بالتسجيل المشترك للمنتجين المقسمين S-1 SLC (الرئيسي والتابع) لنفس الرقعة الفرعية استناداً إلى معلومات المدار المضافة في الخطوة السابقة والمعلومات من نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) الذي يتم تنزيله بواسطة SNAP.

يتم حالياً دعم نماذج DEM التالية: SRTM 3Sec، 1Sec Grid، ACE30، ACE2\_5min، ASTER 1sec GDEM، GETASSE30، SRTM.

في بحثنا قمنا باختيار SRTM 1Sec حيث تتم إعادة تشكيله، باستخدام طرق متعددة للاستيفاء للحصول على قيم الارتفاع من ملف DEM الأصلي. حيث تتوفر عدة طرق للاستيفاء منها: ثنائي الخط bi-linear والجار الأقرب nearest neighbour والالتواء المكعب cubic convolution وثنائية المكعب bi-cubic.

تنتج Bicubic صوراً أكثر وضوحاً بشكل ملحوظ من الطرق السابقة، وربما تكون مزيجاً مثالياً من وقت المعالجة وجودة الإخراج.



شكل 2. الرقعة الفرعية IW2 والرشقات 8 و9 في منطقة تملكخ في حالة المدار الهابط.

لتشكيل التداخل ونطاقات التماسك، نقوم بتطبيق عامل تشكيل مخطط التداخل Interferogram Formation باستخدام منتج المكسب الأساسي الذي قمنا بإنشائه في الخطوة السابقة كمدخل ونقوم بطرح طور الأرض المسطحة وهو الطور الموجود في إشارة قياس التداخل بسبب انحناء السطح المرجعي. حيث يتم تقدير طور الأرض المسطحة (الطور المرجعي) باستخدام معلومات البيانات الوصفية المدارية وطرحها من مخطط التداخل المعقد.

يتم حساب طور الأرض المسطحة في عدد من النقاط الموزعة على الصورة الإجمالية، يتراوح عدد هذه النقاط بين 301 وحتى 1001 وذلك لحساب الطور المرجعي باستخدام تقدير المربعات الصغرى.

تم اختيار القيمة 501، وهي كافية بالنسبة لمنتجنا ويمكن تعديل هذا الرقم بالنسبة للمشاهد الأكبر أو الأصغر. وبعد ذلك يتم تقدير متعدد الحدود ثنائي الأبعاد (باستخدام المربعات الصغرى) والذي يناسب هذه "الأرصاد"، وقد تم اختيار متعدد الحدود من الدرجة 5 لنمذجة الطور المرجعي في دراستنا. في حين أنه يتم استخدام درجة أعلى للمشاهد ذات الرقعة الطويلة.

يتم تقدير التماسك كمنطقة نقطية منفصل ويظهر مدى تشابه كل بكسل بين الصورتين الرئيسية والتابعة بمقياس من 0 إلى 1 وهو مؤشر لجودة معلومات الطور، تم حساب نطاق التماسك في البرنامج على أساس نافذة من (10x3) بيكسل في اتجاه المدى/السمت.

ثم تتم إزالة خطوط التماسك في مخطط التداخل الناتج باستخدام العملية (TOPS Deburst)، يحتوي الإخراج على نفس النطاقات مثل الإدخال، ولكن مع رشقات مدمجة وفقاً لزمناً دوبلر الصفري.

تعد تصفية الطور إحدى تقنيات المعالجة المسبقة التي تقلل بشكل كبير من البقايا في خطوة فك تغليف الطور اللاحقة وتعزز دقة فك التغليف. الطريقة المطبقة في البرنامج هي خوارزمية تكيفية غير خطية اقترحها غولدستين وفيرنر. تطبق عملية التصفية Goldstein Phase Filtering على المنتج الناتج عن الخطوة السابقة، حيث تقع قيمة أس عامل التصفية التكيفي في النطاق (0،1). وتم اختيار القيمة (1) حيث أصبحت التصفية أقوى. وهذا ما يساعدنا لاحقاً بشكل كبير في عمليات المعالجة. أثناء خطوات المعالجة السابقة، ربما تم إدخال وحدات بكسل فارغة على حافة مخطط التداخل، على سبيل المثال في المناطق التي لا تغطيها كلتا الصورتين المدخلتين. لاقتصاص هذه المناطق، يمكن استخدام عامل المجموعة الفرعية Subset ونقوم بتطبيقه على المنتج الذي تمت تصفيته في الخطوة السابقة ولا يؤدي هذا إلى تقليل حجم البيانات التي تتم معالجتها في الخطوات اللاحقة فحسب، بل يمنع أيضاً حدوث أخطاء لاحقة في فك التغليف.

من أجل تنفيذ فك التماسك الطور، قمنا بالاعتماد على الأداة المطورة (Snaphu Export) لتحويل مخطط التداخل كطور مغلف إلى تنسيق يمكن تشغيله بواسطة أداة الـ (SNAPHU)، الإحصائيات المتعلقة ببيانات الإدخال بالحل تعتمد على الكمية المقاسة، حيث تتضمن SNAPHU ثلاثة نماذج إحصائية مدمجة، لبيانات التضاريس، وبيانات التشوه، والبيانات العامة للسلسلة.

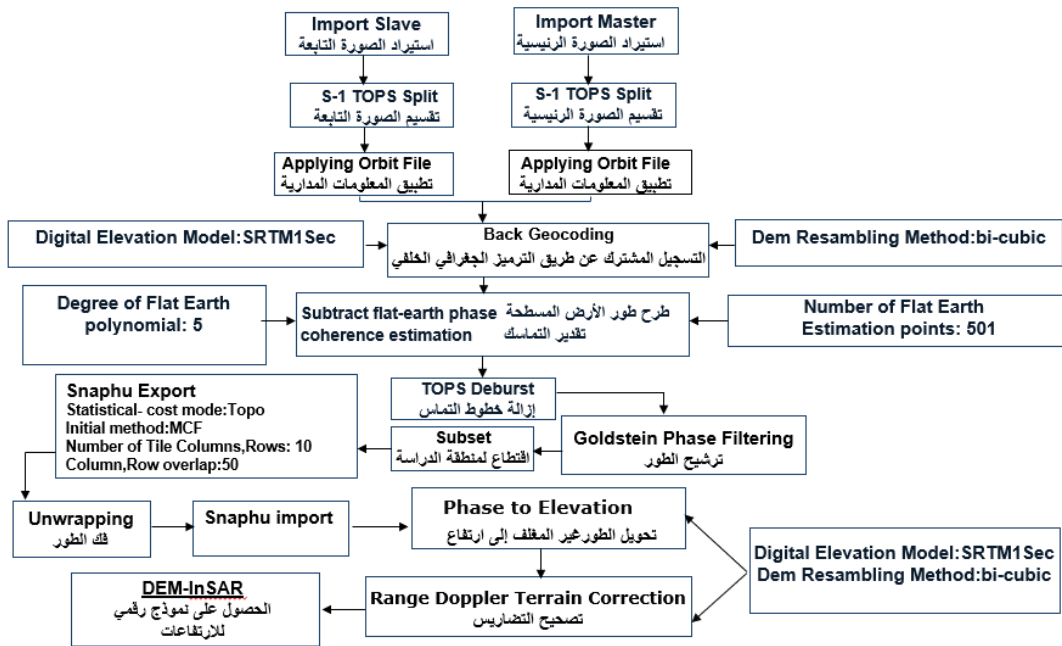
قمنا بتحديد TOPO كوضع التكلفة الإحصائية. وقد تم اعتماد طريقة الحد الأدنى لتدفق التكلفة (MCF) لإجراء التحسين التكراري والتي أعطت نتائج أفضل من طريقة الحد الأدنى من الشجرة الممتدة (MST) Minimum Spanning Tree. لاحظنا أن فك التغليف قد يستغرق وقتاً طويلاً، لذلك تم تقسيم البيانات النقطية إلى أجزاء أصغر (بلاطات)، حيث تم تقسيم مخطط التداخل المغلف إلى 10 صفوف و10 أعمدة، مما يؤدي إلى إلغاء تغليف إجمالي 100 بلاطة. قمنا بدمج هذه البلاطات بعد ذلك بناءً على تداخل البكسل المحدد (قمنا باختيار 50 بكسل). واعتماداً على عدد معالجات جهاز الكمبيوتر، يمكننا أيضاً زيادة متغير عدد المعالجات.

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).

أصبح الطور غير المغلف الآن عبارة عن بيانات نقطية مستمرة ولكنها ليست مقياساً مترياً بعد. لتحويل وحدات الراديات إلى ارتفاعات مطلقة، يتم تشغيل إجراء (phase to elevation) على الطور غير المغلف الذي تم استيراده في الخطوة الأخيرة وهكذا تتم ترجمة الطور إلى ارتفاعات سطحية على طول خط النظر (LOS) بالأمتار. يتم استخدام DEM لوضع قيم الارتفاع في المستوى الصحيح. حيث نحدد SRTM 1Sec HGT (التنزيل التلقائي) كمدخل DEM. الصورة الناتجة مشابهة لصورة الطور غير المغلف (منحدر ألوان محدد مسبقاً مختلف قليلاً)، ولكن الآن أصبح لكل بكسل قيمة مترية تشير إلى ارتفاعه فوق مستوى سطح البحر.

يعمل تصحيح التضاريس على ترميز الصورة جغرافياً عن طريق تصحيح التشوهات الهندسية لـ (SAR) بسبب هندسة الإضاءة، وذلك باستخدام نموذج الارتفاع الرقمي ونحصل على منتج مُسقط على الخريطة. تهدف تصحيحات التضاريس

إلى تعويض هذه التشوهات بحيث يكون التمثيل الهندسي للصورة أقرب ما يكون إلى العالم الحقيقي. يحول الترميز الجغرافي الصورة من هندسة النطاق المائل أو هندسة النطاق الأرضي إلى نظام إحداثيات خريطة، وذلك بتطبيق منهجية ( Range Doppler) باستخدام عامل تصحيح التضاريس (Correction Range Doppler Terrain). حيث يتم استخدام معلومات متجه حالة المدار المتاحة في البيانات، والشروح التوضيحية لتوقيت الرادار، ومعلومات تحويل المدى المائل إلى الأرضي مع بيانات DEM المرجعية لاستخلاص معلومات تحديد الموقع الجغرافي الدقيقة. نحدد SRTM 1Sec HGT (التنزيل التلقائي) كمدخل DEM، يقوم SNAP بإنشاء اتصال بقاعدة بيانات الارتفاع الخارجية لتنزيل جميع مربعات SRTM المطلوبة لتغطية مجموعة بيانات الإدخال بالكامل، وبنهاية هذا الإجراء نحصل على صورة نقطية مرمزة جغرافياً للارتفاعات. يبين الشكل (3) المنهجية المتبعة في الحصول على نموذج الارتفاعات الرقمي.



شكل 3. منهجية المعالجة للحصول على DEM.

#### 4. دراسة تأثير البارامترات ضمن تركيبات مختلفة على دقة النموذج الرقمي للارتفاعات

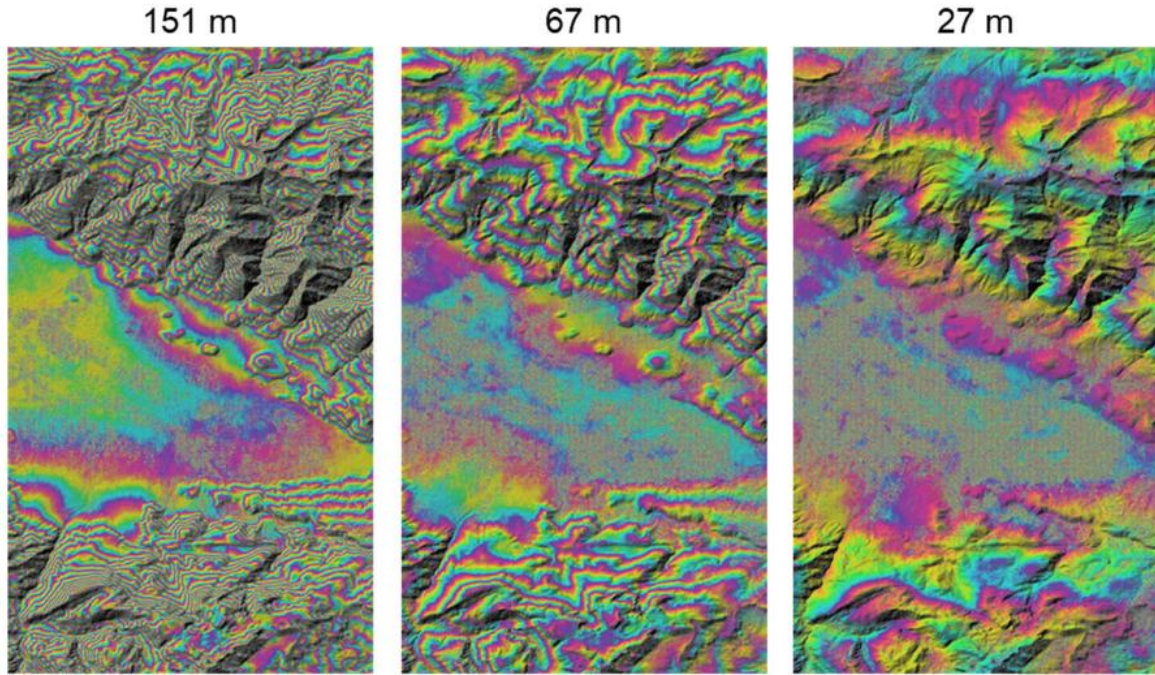
من الممكن إنشاء (DEMs) بناءً على قياس التداخل بالرادار بواسطة صور القمر (Sentinel-1) عند تحقيق المتطلبات الأساسية، من طول خطوط الأساس الزمنية والعمودية. إذ يتحكم خط الأساس الأول في المقدار المتوقع لعدم الترابط الزمني على الأسطح الطبيعية بينما يحدد الثاني مقدار تغير الارتفاع، والذي تمثله دورة الطور. بالإضافة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

قامت العديد من الأبحاث بدراسة تأثير البارامترات المختلفة على جودة قياس التداخل وبالتالي دقة الارتفاعات المشتقة، وحددت القيم الملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي.

ذكرت العديد من الأدبيات والدراسات أنه يجب أن يتراوح خط الأساس العمودي لاستحواذ الصور بالعبور المتكرر repeat-pass acquisition بين 150 و 400 متر للسماح بوصف دقيق للتغيرات الطبوغرافية بواسطة الهوامش المرصودة [4] ،

يتم تمثيل فرق الارتفاع من خلال دورة طور واحدة والتي تزداد مع خطوط أساس عمودية أصغر. وبناءً على ذلك، تكون أزواج الصور ذات خطوط الأساس المكانية الصغيرة أقل حساسية لاختلافات الارتفاع. مما يؤدي إلى فقدان معلومات الارتفاع لخطوط الأساس العمودية الأصغر وزيادة ضجيج الطور. تتم الإشارة إلى ذلك أيضاً من خلال الزيادة الكبيرة في قيم RMSE للارتفاعات المشتقة، والتي تم حسابها بالمقارنة مع ارتفاعات SRTM المتاحة [3]. واعتماداً على وعورة التضاريس، تتراوح خطوط الأساس العمودية الملائمة لرسم الخرائط الطبوغرافية بين 100 و500 متر. وينبغي أن تكون خطوط الأساس الزمنية لرسم الخرائط الطبوغرافية قصيرة قدر الإمكان، لتقليل تأثير عدم الارتباط الزمني [5]. تعتمد جودة النموذج الرقمي للتضاريس بشكل كبير على خصائص الصور، والأهم من ذلك موقع الأقمار الاصطناعية في وقت الاقتناء. وتسمى المسافة النسبية بينهما "قاعدة الأساس العمودية". كلما زاد هذا الفارق، زادت كمية التفاصيل التي ستكون متاحة في التداخل المحسوب بالنسبة لتغيرات الارتفاع.

يوضح الشكل (4) أن وجود خط أساس عمودي بقيمة 151 متراً يؤدي إلى زيادة كثافة أنماط التداخل وبالتالي تكون أكثر ملاءمة لوصف تغيرات التضاريس مقارنةً بقواعد الأساس بقيمة 67 متراً أو 27 متراً. الوقت بين الصورة الأولى والثانية يُعرف بقاعدة الأساس الزمنية أو خط الأساس الزمني. كلما كانت هذه الفترة أقصر (في أفضل الحالات 6 أو 12 يوماً للقمر Sentinel-1)، كلما كانت فقدان جودة التداخل أقل بسبب تحلل الطور، خاصةً فوق الأسطح الطبيعية [3]. كما أن القواعد الزمنية الطويلة تؤدي إلى سوء جودة التداخل بسبب انخفاض التماسك، حيث لا يمكن استخراج معلومات ارتفاع موثوقة في مناطق التماسك المنخفض. وإذا أصبحت هذه المناطق هي السائدة في التداخل، فإنه لا يمكن استخراج نموذج رقمي للتضاريس بشكل عام.



شكل 4. تأثير خط الأساس العمودي على مخطط التداخل [3].

وبما أن البارامترات الملائمة لا تتوفر دائماً معاً، سنقوم بدراسة التركيبات المختلفة للبارامترات وسيتم تقييم دقة الارتفاعات في حالة وجود بارامترات ملائمة وأخرى غير ملائمة وفقاً لمنطقة الدراسة.

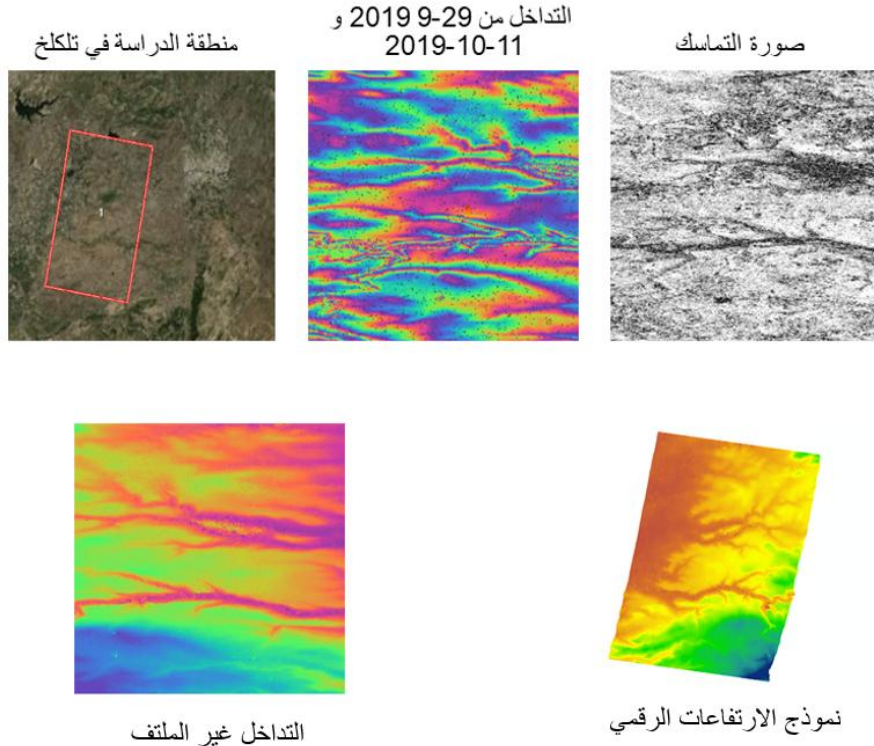
من أجل منطقة تلكلخ ذات التضاريس الوعرة والغطاء النباتي الكثيف تم دراسة التركيبات التالية:

- 1- خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 143 متر ومدار هابط.
- 2- خط أساس زمني غير مثالي 60 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 153 متر ومدار هابط.
- 3- خط أساس زمني مثالي 6 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 176 متر ومدار صاعد.
- 4- خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي غير مثالي 82 متر ومدار صاعد.
- 5- خط أساس زمني غير مثالي 36 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 119 متر ومدار صاعد.

من أجل منطقة القريتين ذات التضاريس السهلية والغطاء النباتي المنخفض تم دراسة تركيبات مختلفة:

- 6- خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 151 متر ومدار هابط.
- 7- خط أساس زمني غير مثالي 96 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 177 متر ومدار هابط.
- 8- خط أساس زمني مثالي 6 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 176 متر ومدار صاعد.
- 9- خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي غير مثالي 82 متر ومدار صاعد.
- 10- خط أساس زمني غير مثالي 36 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 119 متر ومدار صاعد.

لدراسة تأثير البارامترات ضمن التركيبات المختلفة على دقة النموذج الرقمي للتضاريس المولد، تم الاعتماد على (200) نقطة تم قياسها حقلياً ضمن أعمال المسح الأرضي في منطقتي تلكلخ والقريتين، ولمقارنة قيم المسح الحقلية مع قيم الارتفاعات في النموذج الرقمي للتضاريس تم استخراج الارتفاعات الموافقة لهذه النقاط ضمن برنامج (QGIS) من نماذج الارتفاعات الرقمية التي تم حسابها لأزواج الصور في الجدول (4) باستخدام برنامج (SNAP8). يبين الشكل (5) خطوات توليد (DEM) للصورتين بتاريخ (2019-9-29) و(2019-10-11) في منطقة تلكلخ.



شكل 5. خطوات توليد الـ (DEM) من صورتي (Sentinel1) في تلكلخ.

#### 1.4. دراسة تأثير الغطاء النباتي والتضاريس على دقة النماذج الرقمية للارتفاعات

تمت دراسة تأثير الغطاء النباتي والتضاريس على دقة الارتفاعات الناتجة، بتركيبات ملائمة وغير ملائمة مختلفة. حيث تم استخدام ثلاث تركيبات متماثلة لخط الأساس الزمني والعمودي ونوع المدار في منطقتي تلكلخ والقرينتين. تم استخدام التركيبات 3 و4 و5 في منطقة تلكلخ، وتم أيضاً استخدام التركيبات 8 و9 و10 في القرينتين. لمقارنة النتائج اعتمدنا على مجموعة من المعايير الإحصائية، حيث تم حساب الفروق بين الارتفاعات المستخرجة وارتفاعات النقاط الحقلية المقاسة، كذلك المتوسط (MEAN) والانحراف المعياري (SD) لهذه الفروق من أجل تقييم دقة نماذج الارتفاعات المشتقة وحساب جذر الخطأ المتوسط التربيعي (RMSE). حيث: (SD) هو الانحراف المعياري للفروقات (الجذر التربيعي لنتائج قسمة مجموع مربعات انحرافات قيم (Diff) (حيث  $Diff = ارتفاع\ النقطة\ الحقلية\ المستخرج\ في\ النموذج\ DEM - ارتفاع\ النقطة\ الحقلية\ المقاسة$ ) عن متوسط هذه الفروقات على عدد النقاط (200)).

أما (RMSE) جذر الخطأ المتوسط التربيعي للارتفاعات المشتقة وهو (الجذر التربيعي لنتائج قسمة مجموع مربعات انحرافات قيم الارتفاعات المشتقة عن القيم الحقلية المقاسة على عدد النقاط (200)). يعد الـ (MEAN) والـ (RMSE) أكثر المقاييس شيوعاً في معظم دراسات تقييم الدقة الإحصائية للنماذج الرقمية للتضاريس لأنها حساباتها تستند إلى مرجع (DEM) ذي جودة أعلى أو نقاط حقلية، وتعطي مقياساً للانحراف بالأمتار [6]. يوضح الجدول (2) قيم (SD) للفروقات (Diff) وقيمة (RMSE). وذلك في حالة المدار الصاعد في منطقتي تلكلخ والقرينتين من أجل خطوط الأساس الزمنية (6) و(12) و(36) يوماً، وخطوط الأساس العمودية (176) و(82) و(119) م على التوالي.

جدول 2. القيم الإحصائية لنماذج الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الصاعد في تلكلخ والقرينتين من أجل خطوط الأساس الزمنية والعمودية نفسها.

DEM_ InSAR	القرينتين		تلكلخ	
	SD (m)	RMSE (m)	SD (m)	RMSE (m)
InSAR (119 m, 36 days)	10.02	14.01	32.02	68.54
InSAR (82 m, 12 days)	20.41	68.77	34.35	148.91
InSAR (176 m, 6 days)	4.51	10.67	6.84	46.27

نلاحظ أن قيم (RMSE) و (SD) تتناقص في القرينتين عند مقارنتها بالقيم في منطقة تلكلخ من أجل خطوط الأساس العمودية والزمنية نفسها وبالتالي نموذج الارتفاع أكثر دقة في القرينتين في حالة المدار الصاعد عند مقارنته مع نموذج الارتفاع في تلكلخ ومن أجل نفس البارامترات. ويمكن تفسير ذلك بوعورة التضاريس وكثافة الغطاء النباتي في تلكلخ وتأثيره على قيم التماسك، حيث تظهر المناطق المزروعة عدم ترابط سريع جداً بمرور الوقت بسبب التباين الكبير في الخصائص الفيزيائية للمبثرات مما يؤثر على جودة قياس الطور وبالتالي نتائج قياس الارتفاعات.

#### 2.4. تأثير خط الأساس الزمني والعمودي على دقة النماذج الرقمية للارتفاعات

تمت دراسة تأثير خط الأساس الزمني على دقة الارتفاعات الناتجة في منطقتي تلكلخ والقريتين في المدار الهابط. حيث تم استخدام تركيبتين مختلفتين لمنطقة تلكلخ:

التركيبية رقم 1: خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 143 متر ومدار هابط.

التركيبية رقم 2: خط أساس زمني غير مثالي 60 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 153 متر ومدار هابط.

وتم استخدام التركيبتين التاليتين لمنطقة القريتين:

التركيبية رقم 6: خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 151 متر ومدار هابط.

التركيبية رقم 7: خط أساس زمني غير مثالي 96 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 177 متر ومدار هابط.

يوضح الجدول (3) هذه القيم الإحصائية في تلكلخ في حالة المدار الهابط من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(60) يوماً وخطي الأساس العموديين (143) و (153) متر على التوالي.

**جدول 3.** القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الهابط في منطقة تلكلخ من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(60) يوماً.

DEM_ InSAR	SD (m)	RMSE (m)
InSAR (143 m, 12 days)	11.58	12.62
InSAR (153 m, 60 days)	22.32	22.70

تبين النتائج في الجدول (3) انخفاض قيمة (RMSE) في منطقة تلكلخ في المدار الهابط من (22.7 م) من أجل قيمة غير ملائمة لخط الأساس الزمني (60 يوماً) وقيمة ملائمة لخط الأساس العمودي (153 م) إلى (12.62 م) من أجل قيمة ملائمة لخط الأساس الزمني (12 يوماً) وقيمة ملائمة لخط الأساس العمودي (143 م).

مع أن التركيبية الثانية حققت خط أساس عمودي مثالي (153 م) وأكبر من خط الأساس العمودي الموجود في التركيبية الأولى (143 م)، ولكن بسبب خط الأساس الزمني الأكبر أعطت نتائج أقل دقة في قيم الارتفاعات الناتجة.

وتؤكد صور التماسك في الشكل (6) هذه النتيجة، حيث توجد 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.



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



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

شكل 6. صور التماسك من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(60) في منطقة تكلخ في حالة المدار الهابط والقيم الدنيا والعظمى للتماسك في الحالتين.

كما يوضح الجدول (4) هذه القيم الإحصائية في القرينتين في حالة المدار الهابط من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(96) يوماً وخطي الأساس العموديين (151) و (177) متر على التوالي.

جدول 4. القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الهابط في منطقة القرينتين من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(96) يوماً.

DEM_ InSAR	SD(m)	RMSE(m)
InSAR (151 m, 12 days)	7.44	8.04
InSAR (177 m, 96 days)	7.62	34.83

من مقارنة النتائج في القرينتين في المدار الهابط في الجدول السابق، نلاحظ تناقص قيم (SD) و(RMSE) في التركيبة السادسة (InSAR (151 m, 12 days) وبالتالي زيادة الدقة، حيث انخفضت قيمة (RMSE) من 34.83 م إلى 8.04 م بتناقص قيمة خط الأساس الزمني من 96 يوماً في التركيبة السابعة إلى 12 يوماً في التركيبة السادسة. مع أن التركيبة السابعة حققت خط أساس عمودي مثالي (177 م) وأكبر من خط الأساس العمودي الموجود في التركيبة السادسة (151 م) إلا أنها أعطت نتائج أقل دقة في قيم الارتفاعات الناتجة نتيجة لخط الأساس الزمني الأكبر.

كذلك، تمت دراسة تأثير خط الأساس العمودي على دقة الارتفاعات الناتجة في منطقتي تكلخ والقرينتين في المدار الصاعد. حيث تم استخدام التركيبين 3 و4 لمنطقة تكلخ والتركيبين 8 و9 لمنطقة القرينتين:

التركيبة رقم 3 ورقم 8: خط أساس زمني مثالي 6 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 176 متر ومدار صاعد.

التركيبة رقم 4 ورقم 9: خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 82 متر ومدار صاعد.

حيث يوضح الجدول (5) قيم الـ (RMSE) للارتفاعات المشتقة والقيم الإحصائية للفروق بين الارتفاعات المستخرجة للنقاط في منطقة تلكلخ في حالة المدار الصاعد من أجل خطي الأساس العموديين (176 م) و (82 م) وخطي الأساس الزمنيين (6) و(12) يوماً على التوالي. حيث نلاحظ تناقص قيم (SD) و(RMSE) بتزايد قيمة خط الأساس العمودي وتزداد بالتالي دقة الارتفاعات المشتقة في تلكلخ.

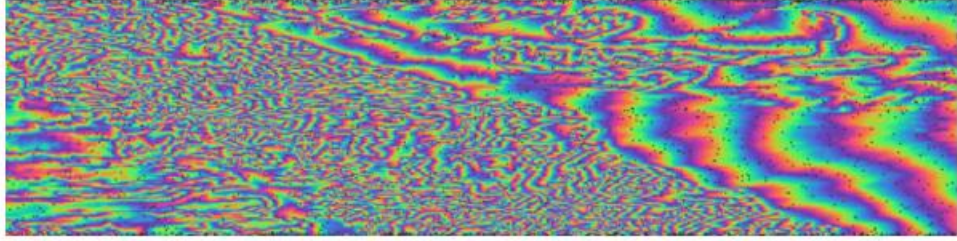
**جدول 5.** القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الصاعد من أجل خطي الأساس العموديين (82 م) و(176 م) في تلكلخ والقريتين.

DEM_ InSAR	القريتين		تلكلخ	
	SD (m)	RMSE (m)	SD (m)	RMSE (m)
InSAR (176 m,6 days)	4.51	10.67	6.84	46.27
InSAR (82 m,12 days)	20.41	68.77	34.35	148.91

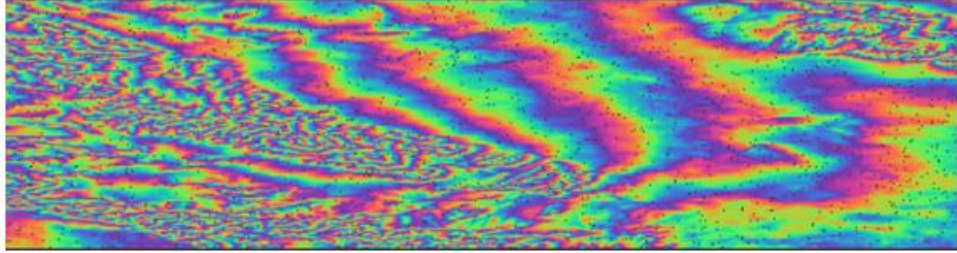
كما يوضح أيضاً تناقص قيم (SD) و(RMSE) بتزايد قيمة خط الأساس العمودي وتزداد بالتالي دقة الارتفاعات المشتقة في القريتين.

يتم عرض مخطط التداخل في مقياس ألوان قوس قزح وتظهر الأنماط، التي تسمى أيضاً (الهوامش) في مخطط التداخل كدورات من الألوان العشوائية. ولاشتقاق الـ (DEM) بجودة كافية، يجب أن تكون هذه الهوامش مرئية في جميع أنحاء الصورة يوضح الشكل (7) 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. حيث 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.

نلاحظ فقدان معلومات الارتفاع لخطوط الأساس العمودية الأصغر وزيادة ضجيج الطور. يشار إلى ذلك أيضاً 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)

شكل 7. مخططات التداخل من أجل خطوط أساس عمودية (82 م) و(176م) في منطقة القريتين في حالة المدار الصاعد.

### 3.4. تقييم دقة الارتفاعات باستخدام تركيبات مختلفة ملائمة وغير ملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي

تمت دراسة تأثير خط الأساس الزمني وخط الأساس العمودي الفاصل بين الصور على دقة الارتفاعات الناتجة، بتركيبات ملائمة وغير ملائمة مختلفة.

حيث تم استخدام تركيبتين مختلفتين لمنطقة تلكلخ ومنطقة القريتين:

التركيبية رقم 4 ورقم 9: خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي غير مثالي 82 متر ومدار صاعد.

التركيبية رقم 5 ورقم 10: خط أساس زمني غير مثالي 36 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 119 متر ومدار صاعد.

حيث يوضح الجدول (9) قيم (SD) للفروقات (Diff) وقيمة (RMSE). وذلك في حالة المدار الصاعد في منطقتي تلكلخ والقريتين من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(36) يوماً، وخطي الأساس العموديين (82) و(119) م على التوالي.

جدول 6. القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الصاعد منطقتي تلكلخ والقريتين من أجل قيم مختلفة لخط الأساس الزمني والعمودي.

DEM_ InSAR	القريتين		تللكخ	
	SD (m)	RMSE (m)	SD (m)	RMSE (m)
InSAR (82 m, 12 days)	20.41	68.77	34.35	148.91
InSAR (119 m, 36 days)	10.02	14.01	32.02	68.54

يمكن أن نستنتج من الجدول أن نماذج الارتفاع الرقمية المشتقة مع بارامترات ملائمة لخط الأساس العمودي وبارامترات غير ملائمة لخط الأساس الزمني في المدار الصاعد دقة أفضل من نماذج الارتفاع الرقمية المشتقة مع بارامترات ملائمة لخط الأساس الزمني وبارامترات غير ملائمة لخط الأساس العمودي في المدار الصاعد في منطقتي تللكخ والقريتين. ووفقاً للنتائج التي حصلنا عليها باستخدام المدار الصاعد وتركيبات مختلفة ملائمة وغير ملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي، يحتل معامل خط الأساس العمودي الأهمية الأكبر في اختيار التركيبة المناسبة، وكان تأثيره أكبر من تأثير خط الأساس الزمني.

#### 4.4. دراسة تأثير نوع المدار على دقة النماذج الرقمية للارتفاعات

نتيجة لمبدأ الاستحواذ الجانبي لأجهزة استشعار SAR المحمولة في الفضاء، تحدث تشوهات هندسية في الصورة، وغالباً ما يتم تلخيصها على أنها تقصير أمامي foreshortening shadow وتوقف layover وظل shadow [7]. لا تؤثر هذه التشوهات الهندسية على استرجاع شدة التبعثر العائد فقط ولكنها تؤدي أيضاً إلى أخطاء في طرق قياس التداخل، وقد تم إظهار تأثيرات منهجية لنماذج InSAR DEMs في مناطق ظل الرادار [8]. وبالإضافة إلى ذلك، تم الإبلاغ عن معدلات خطأ أكبر لتقديرات ارتفاعات InSAR في المناطق المواجهة بعيداً عن المستشعر [9].

لدراسة تأثير نوع المدار واتجاه حركة القمر على دقة الارتفاعات الناتجة، بتركيبات ملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي، قمنا باستخدام تركيبتين مثاليين لمنطقة تللكخ:

التركيبة رقم 1: خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 143 متر ومدار هابط.

التركيبة رقم 3: خط أساس زمني مثالي 6 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 176 متر ومدار صاعد.

وتم أيضاً استخدام تركيبتين مثاليين لمنطقة القريتين:

التركيبة رقم 6: خط أساس زمني مثالي 12 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 151 متر ومدار هابط.

التركيبة رقم 8: خط أساس زمني مثالي 6 يوماً وخط أساس عمودي مثالي 176 متر ومدار صاعد.

حيث يوضح الجدول (7) قيم (SD) للفروقات (Diff) وقيمة (RMSE) في منطقة تللكخ من أجل خطي الأساس الزميين (12) و(6) يوماً، وخطي الأساس العموديين (143) و(176) م والمدارين الهابط والصاعد على التوالي.

**جدول 7.** القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الصاعد والهابط في منطقة تللكخ من أجل قيم ملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي.

DEM	SD (m)	RMSE (m)
( مدار هابط ,143 m, 12 days )	11.58	12.62
( مدار صاعد ,176 m, 6 days )	6.84	46.27

بمقارنة نتائج وقيم (RMSE) في التركيبين الأولى ( مدار هابط ,143 m, 12 days ) والثالثة

( مدار صاعد ,176 m, 6 days ) في منطقة تلكلخ نلاحظ أن التركيبة الأولى قد حققت دقة أفضل من التركيبة الثالثة والتي تتميز ببارامترات أكثر ملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي، حيث بلغت الـ ( RMSE ) قيمة 12.62 متر في التركيبة الأولى بينما ارتفعت قيمتها في التركيبة الثالثة الأكثر ملائمة إلى 46.27 متر.

كما يوضح الجدول (8) قيم (SD) للفروقات (Diff) وقيمة (RMSE) في منطقة القرينتين من أجل خطي الأساس الزمنيين (12) و(6) يوماً، وخطي الأساس العموديين (151) و(176) م والمدارين الهابط والصاعد على التوالي. **جدول 8.** القيم الإحصائية لنموذجي الارتفاعات (InSAR) في حالة المدار الصاعد والهابط في منطقة القرينتين من أجل قيم ملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي.

DEM	SD (m)	RMSE (m)
( مدار هابط ,151 m, 12 days )	7.44	8.04
( مدار صاعد ,176 m, 6 days )	4.51	10.67

بمقارنة نتائج وقيم (RMSE) في التركيبين السادسة ( مدار هابط ,151 m, 12 days ) والثامنة

( مدار صاعد ,176m, 6 days ) في منطقة القرينتين، نلاحظ أن التركيبة السادسة قد حققت دقة أفضل من التركيبة الثامنة والتي تتميز ببارامترات أكثر ملائمة لخط الأساس الزمني والعمودي، حيث بلغت الـ (RMSE) قيمة 8.04 متر في التركيبة السادسة بينما ارتفعت قيمتها في التركيبة الثامنة الأكثر ملائمة إلى 10.67 متر.

## 5. النتائج والمناقشة

في ضوء دراسة التركيبات المختلفة للمعاملات المستخدمة وتحديد التركيبة المناسبة لإنشاء نماذج رقمية للارتفاعات وفقاً لمنطقة الدراسة، واختيار ترتيب هذه البارامترات نتوصل إلى النتائج التالية:

1- يلعب الغطاء النباتي ووعورة التضاريس دوراً مهماً في دقة النموذج الرقمي للارتفاعات فقد كانت دقته في القرينتين

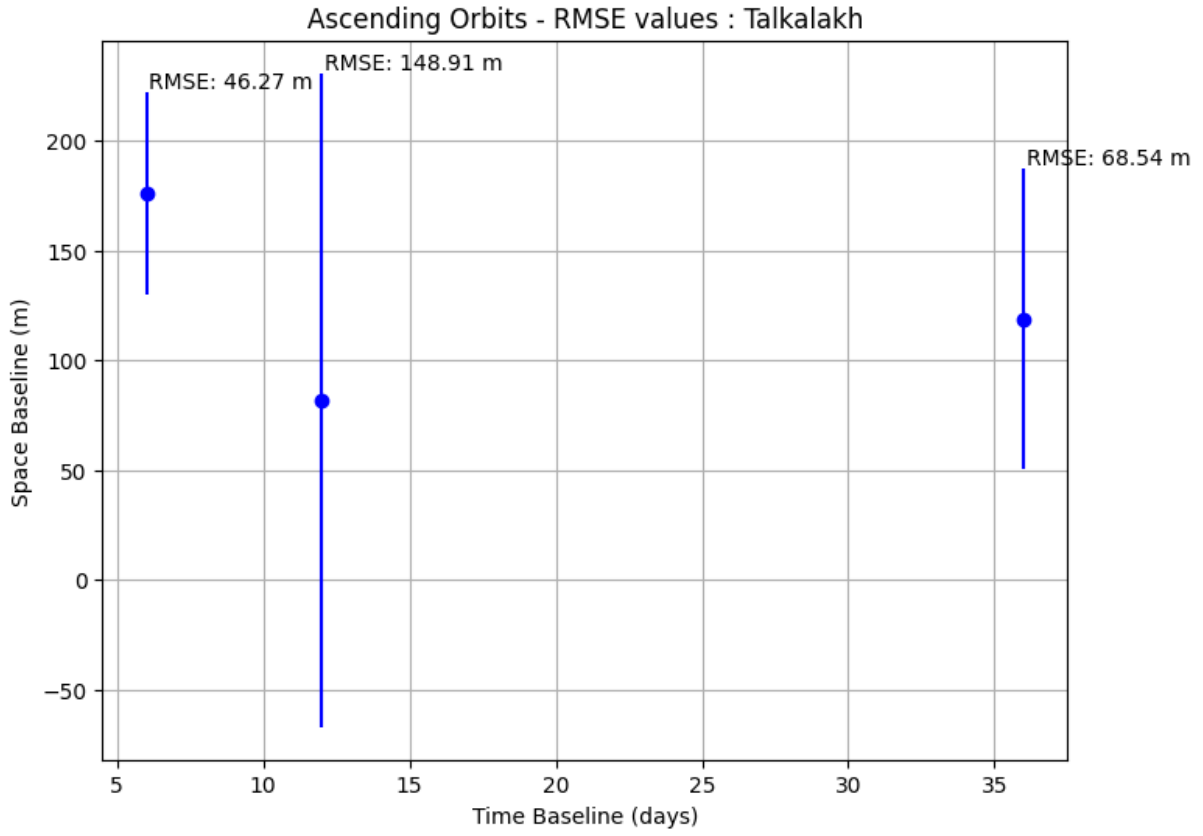
أكبر من دقته في تلكلخ من أجل كافة التركيبات في المدار الصاعد والهابط.

تشير المقارنة بين ثلاث تركيبات في المدار الصاعد مع بارامترات متماثلة في المنطقتين تلكلخ والقرينتين الشكل

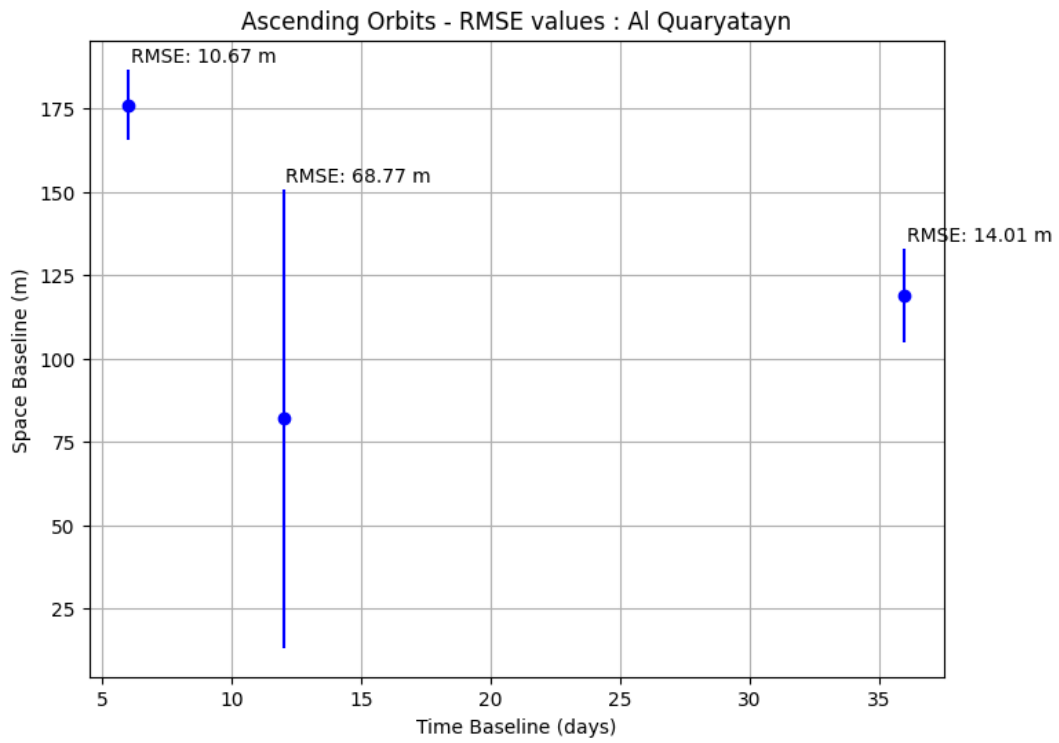
(8) والشكل (9) بأن الدقة في القرينتين أفضل منها في تلكلخ وأنها تحسنت بمقدار 77% في منطقة القرينتين بالنسبة

لتلكلخ للتركيبة (6 يوماً، 176 متر)، وبمقدار 80% للتركيبة (36 يوماً، 119 متر)، كما أنها تحسنت بمقدار 54%

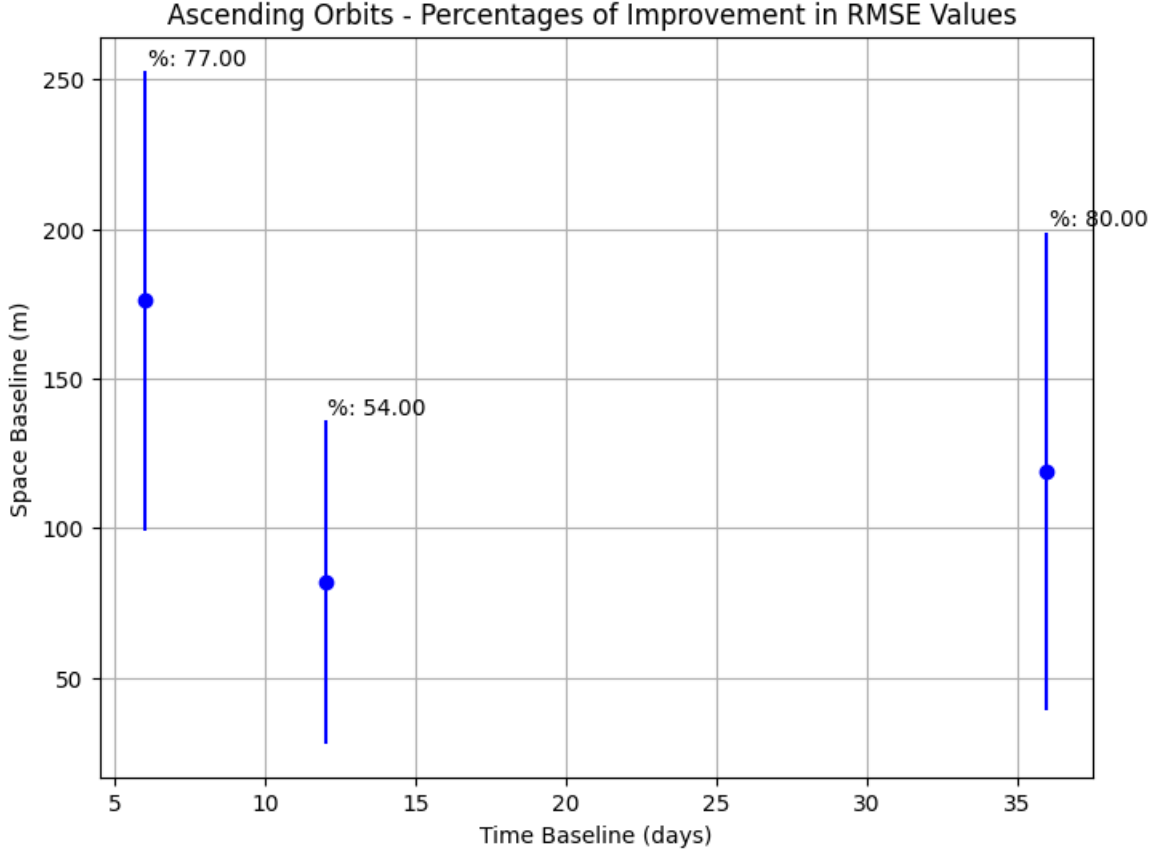
للتريبة (12 يوماً، 82 متر) الشكل (10).



شكل 8. مقارنة بين ثلاث تركيبات مختلفة لإنشاء نموذج رقمي للارتفاعات في منطقة تالكالخ.



شكل 9. مقارنة بين ثلاث تركيبات مختلفة لانشاء نموذج رقمي للارتفاعات في منطقة القرينين.

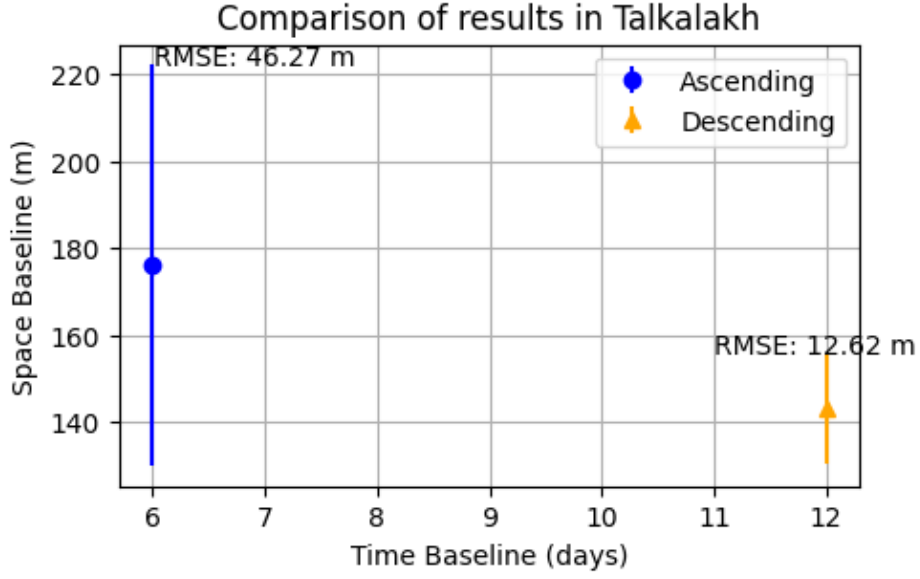


**شكل 10.** نسبة التحسن بين القريتين وتلكخ لثلاث تركيبات مختلفة مع بارمترات متماثلة لانشاء نموذج رقمي للارتفاعات.

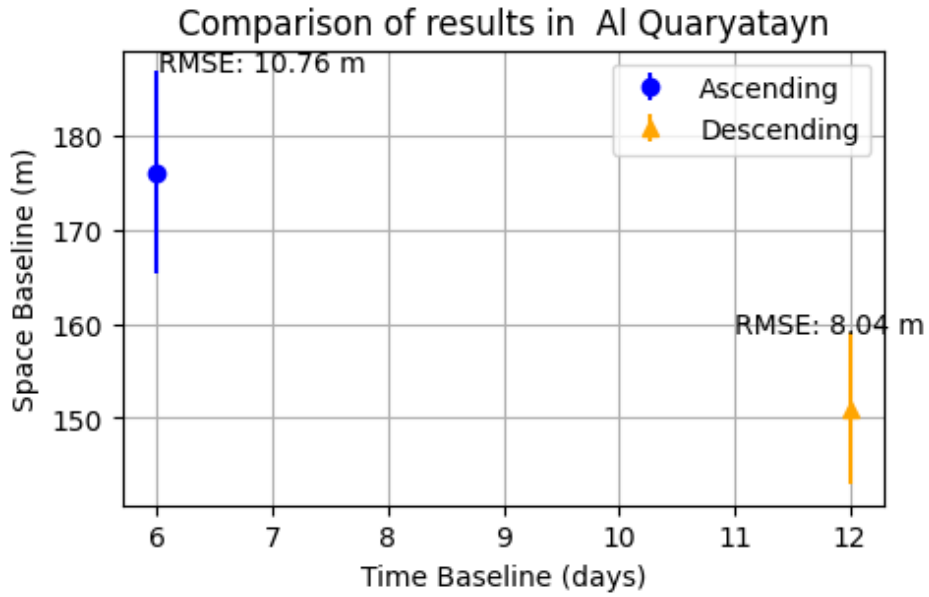
2- في حالة توفر أزواج صور ملائمة من مدار صاعد ومدار هابط يأتي اتجاه حركة القمر ونوع المدار في الترتيب الأول: المدار الهابط أكثر ملائمة من المدار الصاعد في الحصول على نماذج ارتفاع رقمية أكثر دقة في منطقتي الدراسة.

يوضح الشكل (11) بأنه في منطقة تلكخ أعطت التركيبة (12 يوماً و143 متراً) مع مدار هابط دقة أفضل بحوالي 73% من التركيبة (6 يوماً و176 متراً) مع مدار صاعد على الرغم من أن البارمترات فيها كانت أكثر ملائمة من ناحية خط الأساس الزمني والعمودي.

كما يبين الشكل (12) بأنه في منطقة القريتين أعطت التركيبة (12 يوماً و151 متراً) مع مدار هابط دقة أفضل بحوالي 25% من التركيبة (6 يوماً و176 متراً) مع مدار صاعد على الرغم من أن البارمترات فيها كانت أكثر ملائمة من ناحية خط الأساس الزمني والعمودي.



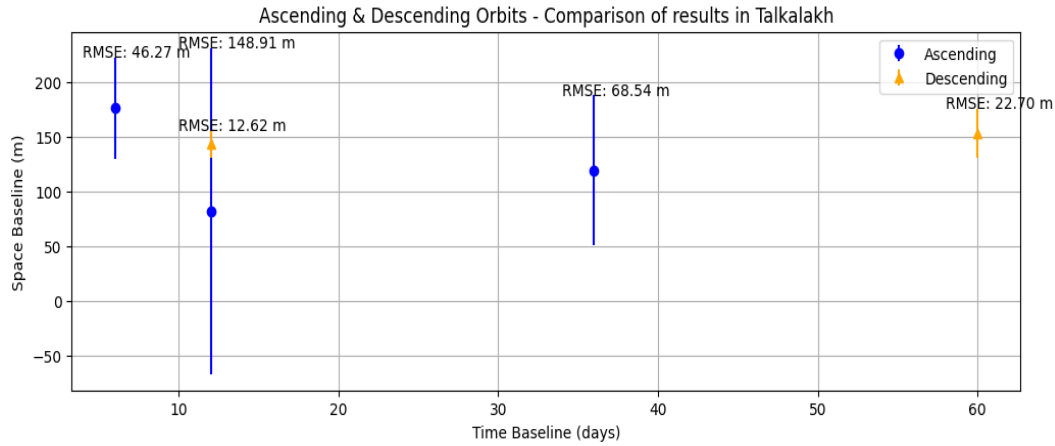
شكل 11. مقارنة بين المدار الصاعد والهابط في منطقة تلكلخ.



شكل 12. مقارنة بين المدار الصاعد والهابط في منطقة القريتين.

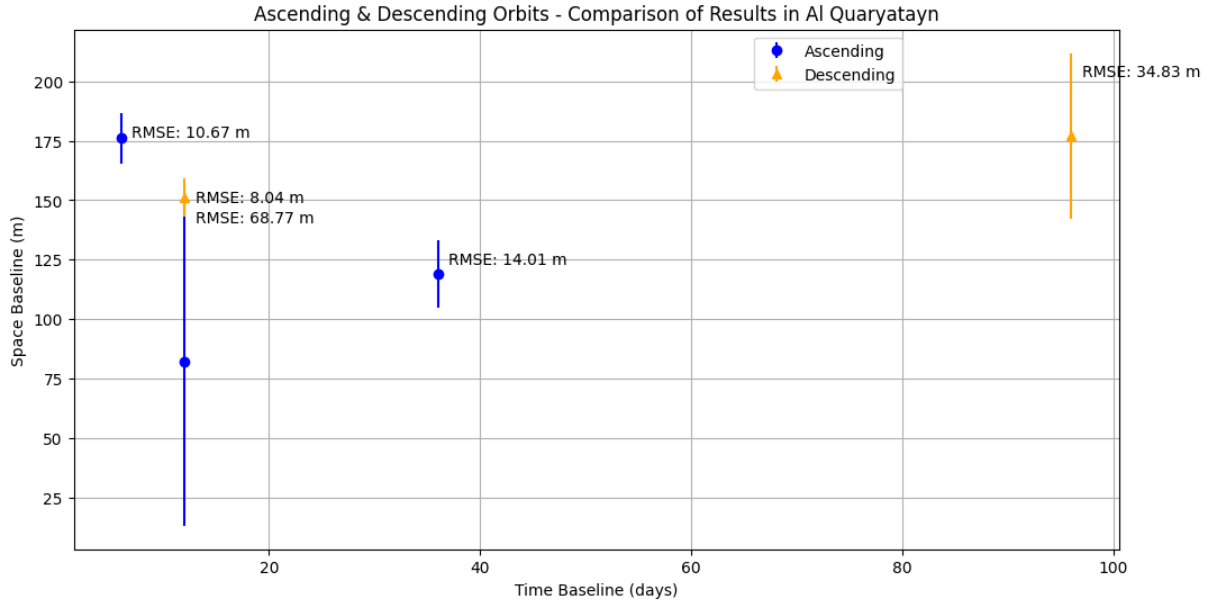
ويمكن تفسير النتائج السابقة في منطقتي تلكلخ والقريتين، بتأثير وطريقة مواجهة التضاريس للقمر الصناعي والتشوهات الهندسية الناتجة والتي تؤدي لعدم أداء فك الطور بالشكل المطلوب مما يؤدي إلى انخفاض دقة الارتفاعات المقاسة. وهنا يظهر تأثير نوع المدار واتجاه حركة القمر في تحديد التركيبة الأكثر ملاءمة والتي تعطي أفضل دقة لقياس الارتفاعات في منطقتي تلكلخ والقريتين، حيث نجد أنه في حال توفرت معاملات ملائمة لخط الأساس العمودي والزمني، يحتل نوع المدار الأهمية الأكبر في اختيار التركيبة المناسبة لأكثر ملاءمة والتي تعطي أفضل دقة لقياس الارتفاعات. بينت النتائج السابقة أن المدار الهابط أكثر ملاءمة في الحصول على نماذج ارتفاعات رقمية أكثر دقة في منطقتي تلكلخ والقريتين.

- 3- تم الحصول على أفضل نموذج ارتفاع رقمي في منطقة تالكلكخ في حالة المدار الهابط من أجل خط أساس زمني (12) يوماً وخط أساس عمودي (143 م) حيث بلغت قيمة الانحراف المعياري (SD) المقدار (11.58م) وكانت قيمة جذر الخطأ المتوسط التربيعي (RMSE) تساوي (12.62 م).
- 4- في منطقة القريتين تم الحصول على أفضل نموذج ارتفاع رقمي أيضاً في حالة المدار الهابط من أجل خط أساس زمني (12) يوماً وخط أساس عمودي (151 م) حيث بلغت قيمة الانحراف المعياري (SD) المقدار (7.44 م) وكانت قيمة جذر الخطأ المتوسط التربيعي (RMSE) تساوي (8.04 م).
- 5- أعطت النماذج الارتفاع الرقمية المشتقة مع بارامترات ملائمة لخط الأساس العمودي وبارامترات غير ملائمة لخط الأساس الزمني في المدار الصاعد دقة أفضل من نماذج الارتفاع الرقمية المشتقة مع بارامترات ملائمة لخط الأساس الزمني وبارامترات غير ملائمة لخط الأساس العمودي.
- حيث تشير المقارنة بين التركيبية الرابعة والخامسة في منطقة تالكلكخ في المدار الصاعد كما يوضح الشكل (13) بأن تأثير خط الأساس العمودي كان له أهمية أكبر من تأثير خط الأساس الزمني على دقة النموذج الناتج، فزيادة خط الأساس العمودي بمقدار 31% في التركيبية الخامسة بالنسبة للرابعة حسنت الدقة بمقدار 54%، على الرغم من أن خط الأساس الزمني قد زاد بمقدار 67%.



**شكل 13.** التركيبات المختلفة لانشاء نموذج رقمي للارتفاعات في منطقة تالكلكخ.

- كما تشير المقارنة بين التركيبية التاسعة والعاشر في منطقة القريتين في المدار الصاعد كما يوضح الشكل (14) بأن زيادة خط الأساس العمودي بمقدار 31% في التركيبية العاشرة بالنسبة للتاسعة حسنت الدقة بمقدار 80% على الرغم من أن خط الأساس الزمني قد زاد بمقدار 67%.



شكل 14. التركيبات المختلفة لإنشاء نموذج رقمي للارتفاعات في منطقة القريتين.

## 6. الاستنتاجات

تم تطوير منهجية عرضنا من خلالها مجموعة من الخطوات التشغيلية اللازمة للمعالجة حسب تقنية الـ InSAR ووضحنا أفضل سلسلة معالجة لتوليد DEM من بيانات SAR Single Look Complex (SLC)، وقد تم مناقشة وعرض الخطوات الرئيسية والثانوية والتي تشمل عدة مراحل رئيسية: تحميل البيانات، والتسجيل المشترك، وإنشاء مخطط التداخل، ومرحلة فك الطور، والترميز الجغرافي، وأخيراً التحقق من دقة وصحة المنتج.

قمنا بدراسة تأثير مجموعة من البارامترات الملائمة وغير الملائمة ضمن تركيبات مختلفة لتقييم جودة وموثوقية النماذج الرقمية للارتفاعات (DEMs) المولدة باستخدام تقنية التداخل الراداري من بيانات القمر الصناعي Sentinel، مثل اتجاه طيران القمر الصناعي (مدار صاعد أو هابط) وخطوط الأساس العمودية والزمانية وطبيعة تضاريس المنطقة المدروسة وكثافة الغطاء النباتي.

تم تنفيذ هذه المنهجية من خلال إجراء دراسة مقارنة باستخدام تقنية التداخل الراداري (InSAR) من بيانات القمر الصناعي (Sentinel-1) عن طريق معالجة (11) زوجاً من الصور في منطقتي تلكلخ والقريتين في مدينة حمص في سورية، ودراسة تأثير عدة بارامترات كخط الأساس الزمني والعمودي واتجاه طيران القمر الصناعي الصاعد والهابط على جودة مخططات التداخل والتماسك وبالتالي قيم الارتفاعات الناتجة.

تم دراسة تأثير التركيبات المختلفة للبارامترات وتقييم دقة الارتفاعات في حالة وجود بارامترات ملائمة وأخرى غير ملائمة، بالإضافة إلى دراسة ترتيب أهمية هذه البارامترات. وتوصلنا من خلال هذه الدراسة إلى النتائج التالية:

- يلعب الغطاء النباتي ووعورة التضاريس دوراً مهماً في دقة النموذج الرقمي للارتفاعات فقد كانت دقته في القريتين أكبر من دقته في تلكلخ من أجل كافة التركيبات في المدار الصاعد والهابط.

- نماذج الارتفاع الرقمية المشتقة مع بارامترات ملائمة لخط الأساس العمودي وبارامترات غير ملائمة لخط الأساس الزمني في المدار الصاعد أعطت دقة أفضل من نماذج الارتفاع الرقمية المشتقة مع بارامترات ملائمة لخط الأساس الزمني وبارامترات غير ملائمة لخط الأساس العمودي.
- في حالة توفر أزواج صور من مدار صاعد ومدار هابط يأتي اتجاه حركة القمر ونوع المدار في الترتيب الأول.
- المدار الهابط كان أكثر ملائمة من المدار الصاعد في الحصول على نماذج ارتفاع رقمية أكثر دقة في منطقتي الدراسة.
- أفضل نموذج ارتفاع رقمي في منطقة تلكلخ ذات التضاريس الوعرة والغطاء النباتي الكثيف في حالة المدار الهابط من أجل خط أساس زمني (12) يوماً وخط أساس عمودي (143 م) حيث كانت قيمة جذر الخطأ المتوسط التربيعي (RMSE) تساوي (12.62 م).
- في منطقة القريتين السهلية ذات الغطاء النباتي المنخفض فقد حصلنا على أفضل نموذج ارتفاع رقمي أيضاً في حالة المدار الهابط من أجل خط أساس زمني (12) يوماً وخط أساس عمودي (151 م) حيث بلغت قيمة جذر الخطأ المتوسط التربيعي (RMSE) المقدار (8.04 م).
- يجب التركيز في الدراسات المستقبلية على دمج الصور ذات التواريخ المتعددة والمسارات الصاعدة والهابطة بدلاً من نهج زوج الصور الواحد لتقليل الأخطاء المحتملة الناتجة عن هندسة الإضاءة والمنتشرة خلال عملية فك الطور وبالتالي زيادة دقة الارتفاعات الناتجة.

## المراجع

- [1] C. Soni, A. Chaudhary, U. Sharma, and C. Sharma, "Satellite radar interferometry for DEM generation using Sentinel-1A imagery," in *Innovations in Computational Intelligence and Computer Vision: Proceedings of ICICV 2020*, Springer, 2021, pp. 26–33.
- [2] C. HIGHLANDS, "EXTRACTING DIGITAL ELEVATION MODEL (DEM) FROM SENTINEL-1 SATELLITE IMAGERY: CASE STUDY A PART OF".
- [4] A. Ferretti, A. Monti-guarnieri, C. Prati, F. Rocca, and D. Massonnet, "InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation," 2007.
- [5] R. F. Hanssen, *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, vol. 2. Springer Science & Business Media, 2001.
- [
- 3] A. Braun, "Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data—open applications, techniques, and limitations," *Open Geosciences*, vol. 13, no. 1, pp. 532–569, 2021.

- [6] A. Braun, “DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges,” SkyWatch Space Applications Inc.: Waterloo, ON, Canada, 2020.
- [7] T. Bayer, R. Winter, and G. Schreier, “Terrain influences in SAR backscatter and attempts to their correction,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, no. 3, 1991, doi: 10.1109/36.79436.
- [8] M. Eineder and J. Holzner, “Interferometric DEMs in Alpine terrain-limits and options for ERS and SRTM,” in *IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Proceedings (Cat. No. 00CH37120)*, IEEE, 2000, pp. 3210–3212.
- [9] J. Breidenbach, B. Koch, G. Kändler, and A. Kleusberg, “Quantifying the influence of slope, aspect, crown shape and stem density on the estimation of tree height at plot level using lidar and InSAR data,” *Int J Remote Sens*, vol. 29, no. 5, pp. 1511–1536, 2008.